

基于钳位子模块的开关对复用型模块化多电平固态变压器

郭宛鑫, 孙毅超, 鄢寅宇, 张艺凡

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210046)

摘要:基于模块化多电平换流器的固态变压器(modular multi-level converter based solid-state transformer, MMC-SST)由于具备多电压等级、多电压形态的端口,在交直流混合配电网中得到广泛关注。双向有源全桥(dual active bridge, DAB)变换器型 MMC-SST 存在功率密度低、成本高等问题,且传统半桥结构的 DAB 型 MMC-SST 在中压直流(medium voltage direct current, MVDC)端口短路故障情况下无法清除故障电流,限制了其在配电网中的应用;传统全桥结构的 DAB 型 MMC-SST 虽具备故障阻断能力,但同时也增加了开关管数目。文中基于混频调制原理,对传统 DAB 型 MMC-SST 的拓扑进行改进,提出基于钳位子模块的开关对复用(clamped switch pair integrated submodule, CSPI)型 MMC-SST 拓扑,该拓扑与传统半桥、全桥结构的 DAB 型 MMC-SST 拓扑相比,不仅节约了开关器件,还使得 SST 具备 MVDC 短路故障清除能力,极大地提高了 DAB 型 MMC-SST 的功率密度和供电可靠性。通过理论分析与仿真模拟,验证了所提 CSPI 型 MMC-SST 拓扑及频率解耦方法的可行性。

关键词:模块化多电平换流器(MMC);固态变压器(SST);基于钳位子模块的开关对复用(CSPI);直流短路故障清除;混频调制;频率解耦

中图分类号:TM41

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2024)06-0033-10

0 引言

近年来,能源结构逐渐转型,风能、光能等可再生能源以及直流负荷在配电网中的应用日益广泛,影响传统配电网的运行稳定性。随着城市负荷多样性需求不断提高,用户对电能稳定性、高效性和经济性的要求也日益增高,兼具可靠性、安全性和稳定性的交直流混合配电网是未来配电网发展的重要形式^[1-5]。

固态变压器(solid-state transformer, SST)具有多电压等级接入、高频隔离和控制灵活等特征,在交直流混合配电网中极具应用潜质^[6-11]。SST 具备多电压等级、多电压形态的端口,使得电能可在交直流、高低压端口之间进行传输。尽管 SST 具有很强的性能优势,但电力电子装置价格昂贵,且现有 SST 功率密度及转换效率都较低^[12],限制了其在交直流混合配电网中的发展。因此,从减少 SST 功率变换级数和 SST 模块数量的角度出发,研究具有高功率密度、高转换效率且含中压直流(medium voltage direct current, MVDC)端口的 SST 十分必要。

模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)能够通过电压源变换器的共模、差模连接方式构造出中压直流端口,已被用于构造面向交直流混合配电网应用的 MMC-SST 输入级。根据 MMC-SST 中间级双向有源全桥(dual active bridge,

DAB)变换器连接方式的不同,主要有2种代表性拓扑。一是输入串联输出并联(input series output parallel, ISOP)型 MMC-SST,即将 DAB 构造成为 ISOP 结构作为 SST 的中间级与输入级 MMC 的中压直流(medium voltage direct current, MVDC)端口相连^[13-17];二是 DAB 型 MMC-SST,即在输入级 MMC 的每一个子模块后接入一个 DAB^[18-23],形成子模块(submodule, SM)-DAB 模块。在 ISOP 型 MMC-SST 中,使用到的 DAB 数量较少, SST 具备较高的功率密度。DAB 型 MMC-SST 拓扑具有控制灵活、易于实现冗余容错等优点,然而每个子模块的直流侧都需要连接 DAB,故在中压配电网中使用,需要大量的开关器件。并且传统半桥子模块(half bridge submodule, HBSM)结构的 DAB 型 MMC-SST 无法清除短路故障电流。

一些改进结构可抑制短路故障电流或使 SST 具备故障电流阻断能力^[24-32]。文献[24-28]从输入级 MMC 的子模块出发,将 HBSM 替换成全桥子模块(full bridge submodule, FBSM)、钳位双子模块^[24]、增强型混合子模块^[25]、单钳位子模块^[26]、移位 FBSM^[27]、反并联绝缘栅双极晶体管(insulated-gate bipolar transistor, IGBT)子模块^[28]等具备负压输出能力的子模块。文献[29-32]从 MMC 的整体结构着手,通过增加额外支路实现故障电流清除,或者通过在故障时刻增加回路电阻、电感抑制故障电流峰值,缩短故障电流清除时间。此类改进型拓扑均需要增加额外开关器件,增加了 DAB 型 MMC-SST

收稿日期:2024-04-15;修回日期:2024-06-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52277188)

的建设成本。

综上所述,与 ISOP 型 MMC-SST 相比,现有 DAB 型 MMC-SST 虽然可以阻断直流短路故障,但也存在着开关器件多、投资成本高等问题。因此,文中对传统 DAB 型 MMC-SST 的拓扑进行改进,提出基于钳位子模块的开关对复用(clamped switch pair integrated submodule, CSPI)型 MMC-SST 拓扑,通过开关对复用,有效减少开关元件数量,降低 DAB 型 MMC-SST 投资成本。此外,为确保拓扑中的高频变压器能够正常工作,文中采用一种子模块混频调制方法。根据拓扑中 MMC 端口和 DAB 端口的结构特性,基于共模差模频率解耦原理,无须添加额外的滤波电路,可实现高频、低频解耦,进一步提高 SST 的功率密度,具有更高的经济性。最后,在 MATLAB/Simulink 中对所提拓扑及控制方法的有效性进行仿真验证。

1 CSPI 型 MMC-SST 拓扑

文献[33]给出了传统 DAB 型 MMC-SST 的通用拓扑,文中所提 CSPI 型 MMC-SST 对上述拓扑中的 SM-DAB 模块进行改进,CSPI 拓扑如图 1 所示。在 CSPI 中,高频变压器 T 左侧为前级电路,右侧为后级电路,CSPI 型 MMC-SST 由多个 CSPI 前级串联后级并联组成。在前级电路中,开关管 S_1 和 S_2 串联构成开关对 1,开关管 S_3 和 S_4 串联构成开关对 2,电容 C_1 和 C_2 串联构成电容桥臂。在此基础上,保护开关管 S_f 串联在开关对 1 中且与 S_1 、 S_2 串联方向相反,保护二极管 D_f 将 S_f 的下端点与电容桥臂的中点连接起来。后级电路与传统 DAB 型 MMC-SST 子模块的后级电路结构相同,由开关管 Q_1 — Q_4 构成的 H 桥整流电路和一个输出并联电容 C_o 组成。开关对 1、电容桥臂、保护开关管 S_f 和保护二极管 D_f 共同构成了 MMC 子模块中的二极管钳位子模块结构^[34];开关对 1、开关对 2、电容桥臂、高频变压器、高频变压器的漏感 L_r 和后级电路共同构成了 DAB 结构。从开关对 1 的中点和 S_f 的下端点引出连接线构成 MMC 端口,从开关对 1 的中点和开关对 2 的中点引出连接线构成 DAB 端口。可见,文中所提 CSPI 型 MMC-SST 在 DAB 型 MMC-SST 的基础上复用了一对开关对,从而减少了开关器件。

就 CSPI 型 MMC-SST 与传统 DAB 型 MMC-SST 在元器件数量以及是否具备故障阻断能力两方面进行比较,具体结果如表 1 所示。其中, N 为 SST 桥臂中包含的子模块数目。传统 DAB 型 MMC-SST 拓扑如图 2 所示。在 DAB 型 MMC-SST 中, HBSM 型

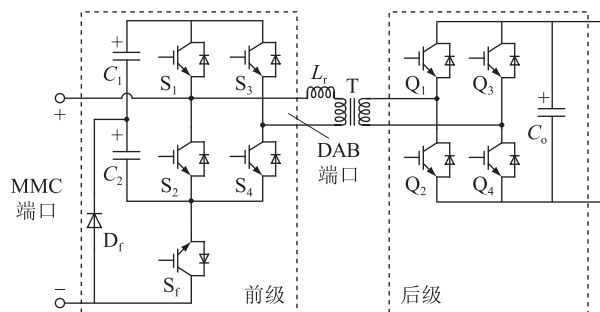


图 1 CSPI 拓扑

Fig.1 The topology of CSPI

拓扑不具备故障阻断能力, FBSM 型拓扑虽具备故障阻断能力,但相对 HBSM 型拓扑所使用的元器件数量有所增多。文中所提 CSPI 型 MMC-SST 不仅具备故障阻断能力,且与 HBSM 型拓扑相比,使用的开关管数量更少。同时,随着开关管数量的减少,所使用的驱动电路、保护电路和开关电源等辅助电路一并减少。由于辅助电路的减少,单元与控制器通信的需求也相应降低。这些对于单元数量庞大的装置来说,不仅可以有效降低硬件复杂度,也通过减少硬件配置降低了装置故障率。

表 1 CSPI 型 MMC-SST 与传统 DAB 型 MMC-SST 对比

Table 1 Comparison of CSPI-type MMC-SST and conventional DAB-type MMC-SST

| 类型 | 开关管数量 | 电容桥臂数量 | 是否具备故障阻断能力 |
|--------|-------|--------|------------|
| HBSM 型 | 60N | 6N | 否 |
| FBSM 型 | 72N | 6N | 是 |
| CSPI 型 | 54N | 6N | 是 |

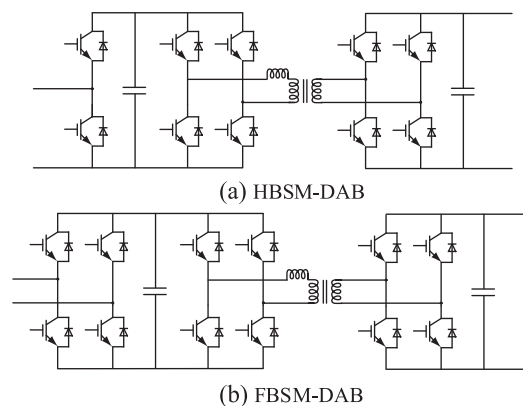


图 2 传统 DAB 型 MMC-SST 拓扑

Fig.2 Conventional DAB-type MMC-SST topology

综上所述,文中所提 CSPI 型 MMC-SST 拓扑使用较少的元器件便可让 SST 具备故障阻断的能力,与传统 DAB 型 MMC-SST 拓扑相比,更具经济优势和性能优势。

2 正常工况下 CSPI 型 MMC-SST 工作原理分析

2.1 CSPI 工作模式分析

由第 1 章拓扑分析可知,CSPI 中 MMC 端口输出电压 u_{pn} 由开关器件 S_1 、 S_2 的导通状态决定,DAB 端口电压 u_h 由开关器件 S_1 — S_4 的导通状态决定。在正常工况下,CSPI 中开关器件 S_f 处于恒定导通状态,因此对于输入级 MMC 而言,由开关对 1、电容桥臂以及 S_f 、 D_f 组成的子模块相当于半桥结构, u_{pn} 只有 0 和电容桥臂电压 2 种情况。在分析中,认为电容 C_1 和 C_2 上的电压均稳定在额定值 U_c 。正常工况下 CSPI 前级电路 4 种工作模式的等效电路如图 3 所示。图 3 中, R 为开关器件的导通电阻; i_{au} 为模块 MMC 端口输入正向电流; i_h 为 DAB 端口输出电流。

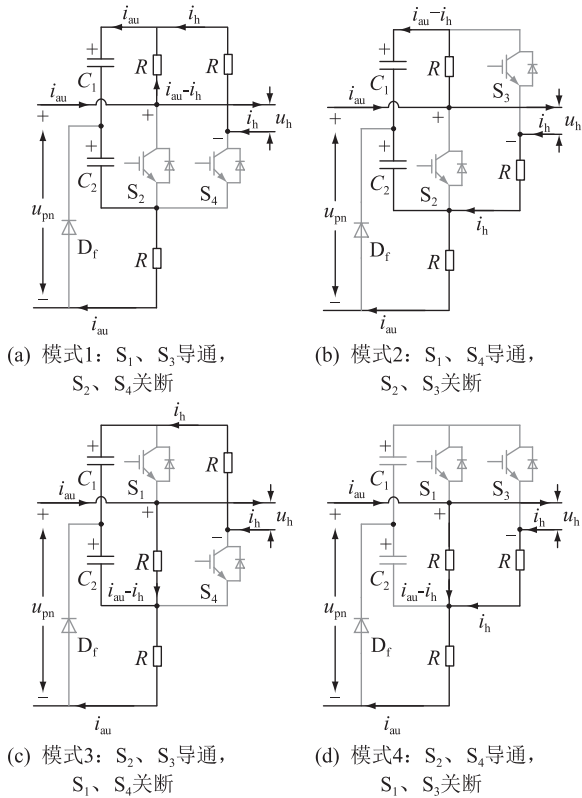


图 3 正常工况下 CSPI 工作原理示意

Fig.3 Schematic diagram of CSPI working principle under normal working condition

(1) 模式 1。开关器件 S_1 、 S_3 导通, S_2 、 S_4 关断。此时流经电容桥臂的电流为 i_{au} , 电流路径如图 3(a) 所示。忽略导通开关器件上的电压, 在该模式下 MMC 端口输出电压 u_{pn} 为 $2U_c$, DAB 端口电压 u_h 为 0。

(2) 模式 2。开关器件 S_1 、 S_4 导通, S_2 、 S_3 关断。此时流经电容桥臂的电流为 $i_{au} - i_h$, 电流路径如图 3(b) 所示。忽略导通开关器件上的电压, 在该模式

下 MMC 端口输出电压 u_{pn} 为 $2U_c$, DAB 端口电压 u_h 为 $2U_c$ 。

(3) 模式 3。开关器件 S_2 、 S_3 导通, S_1 、 S_4 关断。此时流经电容桥臂的电流为 i_h , 电流路径如图 3(c) 所示。忽略导通开关器件上的电压, 在该模式下 MMC 端口输出电压 u_{pn} 为 0, DAB 端口电压 u_h 为 $-2U_c$ 。

(4) 模式 4。开关器件 S_2 、 S_4 导通, S_1 、 S_3 关断。此时电容桥臂被旁路, 电流路径如图 3(d) 所示。忽略导通开关器件上的电压, 在该模式下 MMC 端口输出电压 u_{pn} 为 0, DAB 端口电压 u_h 为 0。

由上述分析可知, 正常工况下, 在 CSPI 的 MMC 端口可以得到一个高电平为 $2U_c$ 、低电平为 0 的两电平电压波形; 在 DAB 端口可以得到一个正负幅值均为 $2U_c$ 的三电平电压波形。

2.2 CSPI 混频调制

在 MMC-SST 正常工作时, MMC 端口要连接低频的交流电网, 而 DAB 端口要连接高频变压器, 开关对 1 的调制信号中需要同时包含高频分量和低频分量。因此须消除开关对 1 中高频信号对 MMC 端口的影响以及低频信号对 DAB 端口的影响。

文中基于混频调制原理^[35], 通过构造互补子模块对消除 MMC 桥臂输出电压高频分量的差模。具体实现方法为在输入级 MMC 的桥臂中定义一个与 CSPI 对应的高频消除 CSPI1, 组成互补子模块对。CSPI1 中开关对 1 的调制波直流分量和基频分量与 CSPI 相同, 高频分量与 CSPI 相反。CSPI 模块开关对 1 的调制信号为:

$$u_r(t) = 1 + \frac{m_1}{2} \sin(\omega_1 t + \theta_1) + \frac{m_2}{2} \sin(\omega_2 t + \theta_2) \quad (1)$$

式中: m_1 、 m_2 分别由 MVDC 端口以及低压直流 (low voltage direct current, LVDC) 端口的功率需求决定, 且满足 $|m_1 + m_2| \leq 2$; $m_1/2$ 、 ω_1 、 θ_1 分别为低频调制波的调制比、角频率和初相角; $m_2/2$ 、 ω_2 、 θ_2 分别为高频调制波的调制比、角频率和初相角。根据文献[35] 推导 MMC 端口输出电压的傅里叶级数表达式并进行分析。由于 MMC 端口连接基频交流电, 可以在桥臂内对高频信号进行解耦。由 MMC-SST 拓扑可知, 桥臂内各个 CSPI 模块的 MMC 端口串联, 由差模解耦原理即可消除高频电压分量。因此, 令每个桥臂 CSPI 模块的数量为偶数, 且两两高频分量互补, 直流分量和基频分量相同, 即可保证在低频交流信号不受影响的前提下消除高频电压信号。与 CSPI 互补的高频消除 CSPI1 开关对 1 的调制信号

表达式为:

$$u_{r1}(t) = 1 + \frac{m_1}{2}\sin(\omega_1 t + \theta_1) - \frac{m_2}{2}\sin(\omega_2 t + \theta_2) \quad (2)$$

进而得到 CSPI 模块和高频消除 CSPII 模块串联后的 MMC 桥臂输出电压表达式为:

$$u_{pn}(t) = 2U_c \left(1 + \frac{m_1}{2}\sin(\omega_1 t + \theta_1) \right) \quad (3)$$

分析可知,该调制方法可以实现 MMC 桥臂输出电压的高频消除,具体方法示意如图 4 所示。

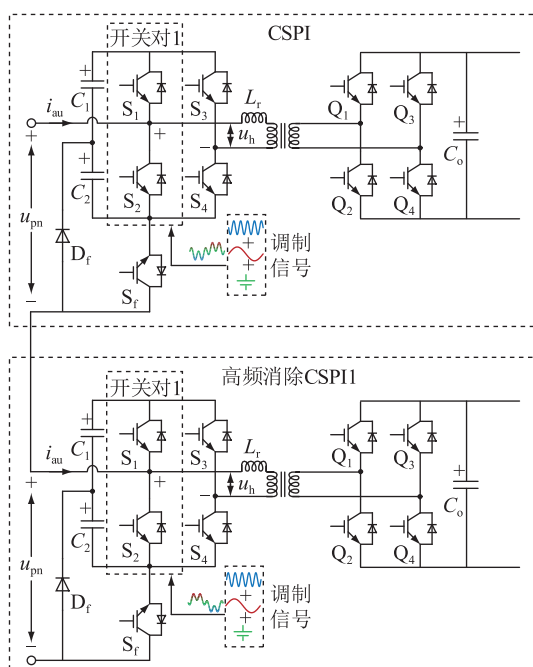


图 4 MMC 桥臂输出电压高频分量消除示意

Fig.4 Schematic diagram of high frequency component elimination for MMC bridge arm output voltage

由 CSPI 拓扑原理可知,DAB 端口与高频变压器相连,为确保高频变压器正常工作,DAB 端口必须要输出高频电压。DAB 端口由开关对 1 和开关对 2 的中点引出线构成,由于开关对 1 中同时包含高频和低频 2 种频率的调制信号,故开关对 2 的调制信号也必须同时含有高频和低频的调制信号。CSPI 的 DAB 端口输出电压属于差模电压,其值等于开关对 1 输出电压减去开关对 2 输出电压,因此开关对 2 的调制信号采用开关对 1 的共模直流和低频调制信号、差模高频调制信号,开关对 2 的混频调制信号为:

$$u_{r2}(t) = u_{r1}(t) = 1 + \frac{m_1}{2}\sin(\omega_1 t + \theta_1) - \frac{m_2}{2}\sin(\omega_2 t + \theta_2) \quad (4)$$

进而得到 DAB 的端口输出电压为:

$$u_h(t) = m_2 U_c \sin(\omega_2 t + \theta_2) \quad (5)$$

由式(5)可知,在开关对 2 中采用开关对 1 的共模直流和低频调制信号、差模高频调制信号,可以使 DAB 端口仅输出高频电压信号。DAB 端口输出电压低频分量消除方法示意如图 5 所示。

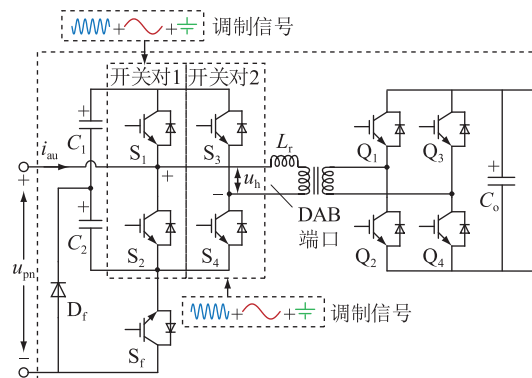


图 5 DAB 端口输出电压低频分量消除示意

Fig.5 Schematic diagram of low frequency component elimination for DAB port output voltage

3 直流短路故障清除工作原理分析

当 MVDC 侧发生直流短路故障时,为避免短路电流过大对 SST 产生影响,需要在短时间内清除短路电流,将 MVDC 端口电压降为 0。文中所提拓扑通过 MMC 端口清除直流短路故障电流,故在分析直流短路故障清除工作原理时只给出 MMC 端口分电路。

在检测到直流短路故障发生后,立即闭锁所有开关器件。直流短路故障时 CSPI 工作原理及闭锁等效电路如图 6 所示。当桥臂电流 $i_{au} \geq 0$ 时,CSPI 中的电容 C_1 和电容 C_2 相当于串联,桥臂电流给两电容充电, u_{pn} 为 $2U_c$,CSPI 相当于一个电压大小为 $2U_c$ 的子模块电容和二二极管串联接在电路中。当桥臂电流 $i_{au} < 0$ 时,CSPI 中只有电容 C_2 接入回路中, u_{pn} 为 U_c ,CSPI 相当于一个电压大小为 U_c 的子模块电容和二二极管串联接在电路中。

将文中所提 CSPI 型 MMC-SST 拓扑用图 6 的闭锁等效电路替换,每个桥臂子模块总数为 N ,得到图 7 所示的 CSPI 短路故障电流路径。对 a、c 两相进行分析。

设 MVDC 侧正极对负极的电压为 U_{dc} ,在分析中认为 CSPI 中电容 C_1 和 C_2 上的电压均稳定在额定值 U_c ,交流系统线电压峰值为 U_{ac} ,导通的二极管承受的正向电压为 U_{diode} 。

当桥臂电流 $i_{au} \geq 0$ 时,如图 7(a) 所示,可以得到:

$$U_{dc} = 2NU_c \quad (6)$$

$$U_{diode} = U_{ac} - 2NU_c \quad (7)$$

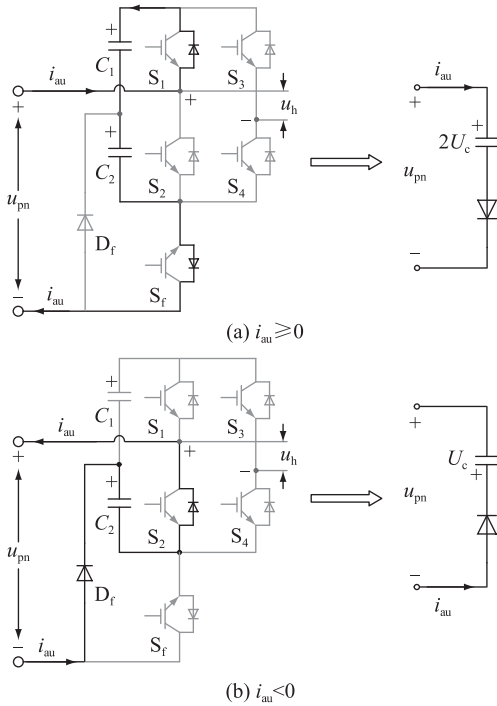


图6 直流短路故障时CSPI工作原理及闭锁等效电路

Fig.6 Operation principle and blocking equivalent circuit of CSPI when DC short-circuit fault occurs

当桥臂电流 $i_{au} < 0$ 时,如图 7(b)所示,可以得到:

$$U_{dc} = NU_c \quad (8)$$

$$U_{diode} = U_{ac} - NU_c C \quad (9)$$

正常工作时,调制度小于等于 1,因此可以得到:

$$U_{ac} \leq \frac{\sqrt{3}}{2} U_{dc} \quad (10)$$

当桥臂电流 $i_{au} \geq 0$ 时,将式(10)代入式(6)、式(7)中,得到:

$$U_{diode} \leq 2NU_c \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - 1 \right) \quad (11)$$

同理,当桥臂电流 $i_{au} < 0$ 时,得到:

$$U_{diode} \leq \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - 1 \right) NU_c \quad (12)$$

由式(11)、式(12)可以看出,无论桥臂电流方向为正还是负,导通的二极管承受的正向电压都为负,二极管都无法导通,也就不存在图 7 中的短路故障电流路径。由图 7 可知,当所有开关器件闭锁后,桥臂中的电流是电感放电电流,其通过二极管向子模块电容充电并迅速下降。这使得系统可以在不断开交流断路器的情况下消除直流故障电流。此外,由于子模块电容在系统进入闭锁状态后被故障电流充电,电容电压不会下降到很低的水平,这对

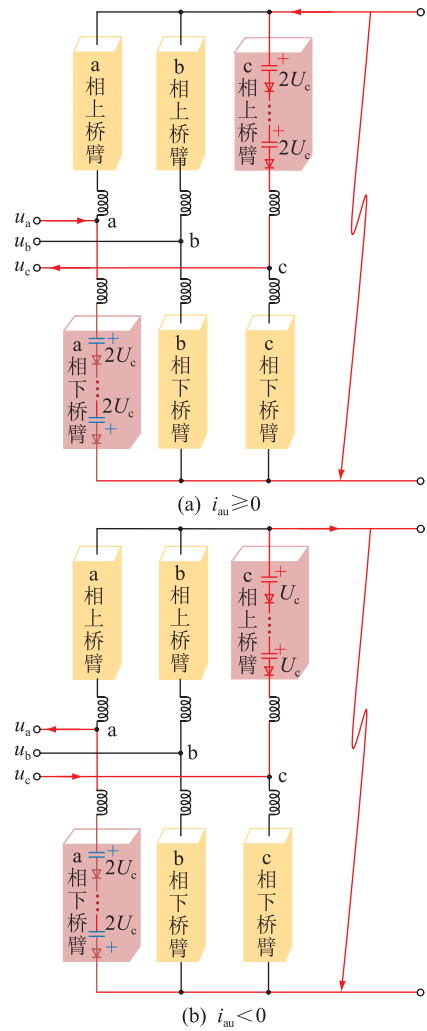


图7 CSPI 短路故障电流路径

Fig.7 Short circuit fault current path of CSPI

故障后重新启动非常有利。

4 仿真实验

为验证文中所提 CSPI 型 MMC-SST 拓扑及相应的基于共模、差模解耦的混频调制策略的有效性,基于 MATLAB/Simulink 搭建相应的仿真模型。仿真所采用的拓扑由输入级 MMC、中间级 DAB 和输出级 3 个部分组成。其中输入级 MMC 提供了中压交流 (medium voltage alternating current, MVAC) 端口和 MVDC 端口, MVAC 端口与三相交流电网相连, MVDC 端口直接与负载相连; 中间级 DAB 的输出并联形成 LVDC 端口, LVDC 端口直接与负载相连; 在 LVDC 端口上连接三相逆变器, 提供了低压交流 (low voltage alternating current, LVAC) 端口, 输出级逆变器不会对整体的控制产生影响, 故在仿真中没有给出。CSPI 型 MMC-SST 的电路参数如表 2 所示, 仿真验证所采用的拓扑如图 8 所示。

表 2 CSPI 型 MMC-SST 的电路参数
Table 2 Circuit parameters of CSPI-type MMC-SST

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|---------------|-------|--------------------|------|
| SST 容量/(MV·A) | 10 | MVDC 端口功率/MW | 4 |
| MVDC 端口电压/kV | 20 | m_2 | 0.6 |
| LVDC 端口电压/V | 750 | C_1, C_2 /mF | 16 |
| MVAC 端口电压/kV | 10 | C_o /mF | 4 |
| U_c /V | 1 250 | 桥臂电感 L_{arm} /mH | 4 |
| 基频调制波频率/Hz | 50 | 桥臂电阻 R_{arm} /Ω | 0.01 |
| 高频调制波频率/Hz | 1 000 | 高频变压器变比 k | 10:3 |
| 载波频率/Hz | 5 000 | L_r /mH | 0.2 |
| 桥臂子模块个数 N | 8 | 高频变压器漏阻 R_l /Ω | 0.05 |

为说明文中所提 CSPI 型 MMC-SST 拓扑及相应控制方法的有效性,分别在正常工况和直流短路故障工况下对其进行仿真验证。

4.1 正常工况

为验证文中所提 CSPI 型 MMC-SST 在正常工况下运行时具有良好的动态性能,在 3 s 时 LVDC 侧发生负载突变,则正常工况下的仿真结果如图 9 所示。

图 9(a)和图 9(b)分别为 CSPI 频率解耦后的 MMC 端口输出电压波形和 DAB 端口电压波形。由仿真结果可知,MMC 端口输出电压为三电平电压波形,直流电压偏置为 $2U_c$,电压频率与 MVAC 端口频率保持一致。DAB 端口输出电压为高频脉冲电压波形,其正负幅值均为 $2U_c$,电压频率与高频调制信

号频率相同。文中所提 CSPI 采用混频调制策略,无需滤波电路便可实现高频调制信号与低频调制信号的解耦,与 2.2 节中的分析一致。

图 9(c)—图 9(f)分别为 CSPI 型 MMC-SST 的 LVDC 端口电压波形、MVDC 端口电压波形、MVAC 端口三相电流波形以及 a 相单个 CSPI 模块电容 C_1, C_2 的电压波形。从 SST 的 3 个端口仿真结果可知,在 LVDC 侧发生功率突变前后,文中所提 CSPI 型 MMC-SST 均可保持正常工作,且在整个动态变化过程中,SST 的各个端口均能保持较好的稳定性。三相交流电流平稳增加,MVDC 端口电压波动仅为额定值的 2%,LVDC 端口电压波动仅为额定值的 10%。当系统处于稳态运行时,MVDC 端口、LVDC 端口的电压波动幅度不超过额定值的 $\pm 0.2\%$,这说明文中所提 SST 具有良好的稳态性能。

4.2 直流短路故障工况

对文中所提 CSPI 型 MMC-SST 拓扑在 MVDC 侧发生直流短路故障下的工况进行验证。在 2.99 s 时,MVDC 端口发生短路故障,短路阻抗为 0.1Ω ,系统在 3 s 时检测到故障,并切换到故障运行工况,直流短路故障工况下的仿真结果如图 10 所示。图 10(a)—图 10(d)分别为发生直流短路故障后 MVAC 端口三相电流波形、a 相上下桥臂子模块电容桥臂电压波形、MVDC 端口电流波形以及 MVDC 端口电压波形。

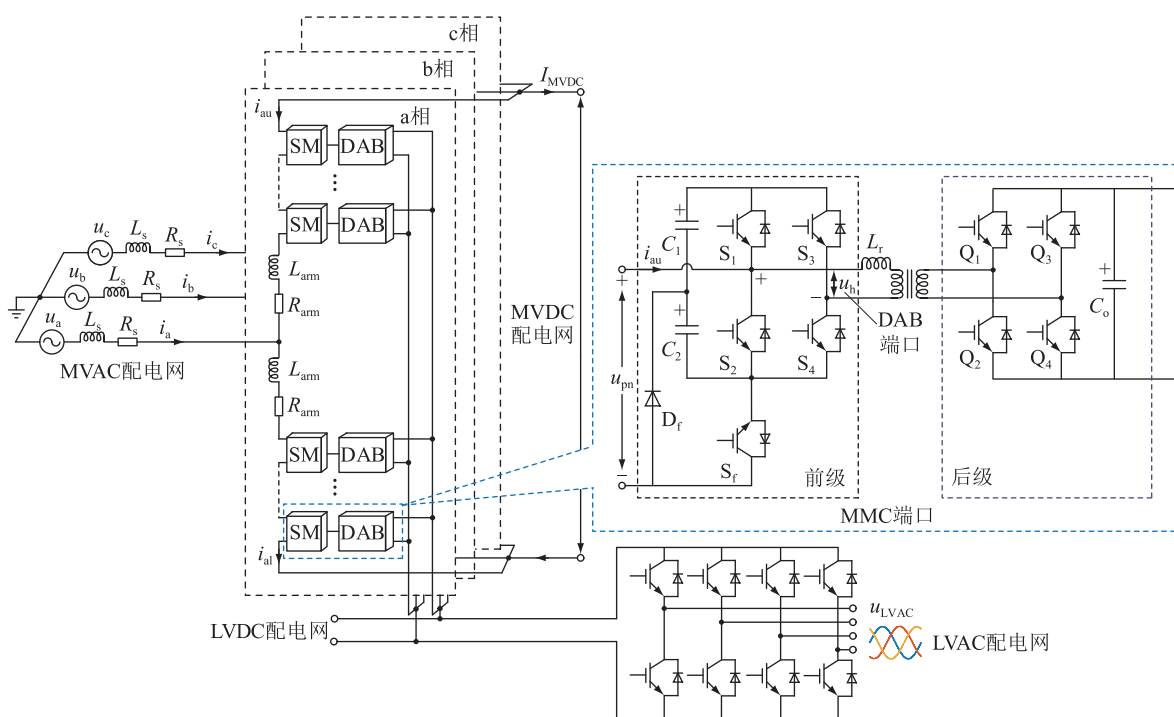


图 8 CSPI 型 MMC-SST 仿真拓扑

Fig.8 Simulation topology of CSPI-type MMC-SST

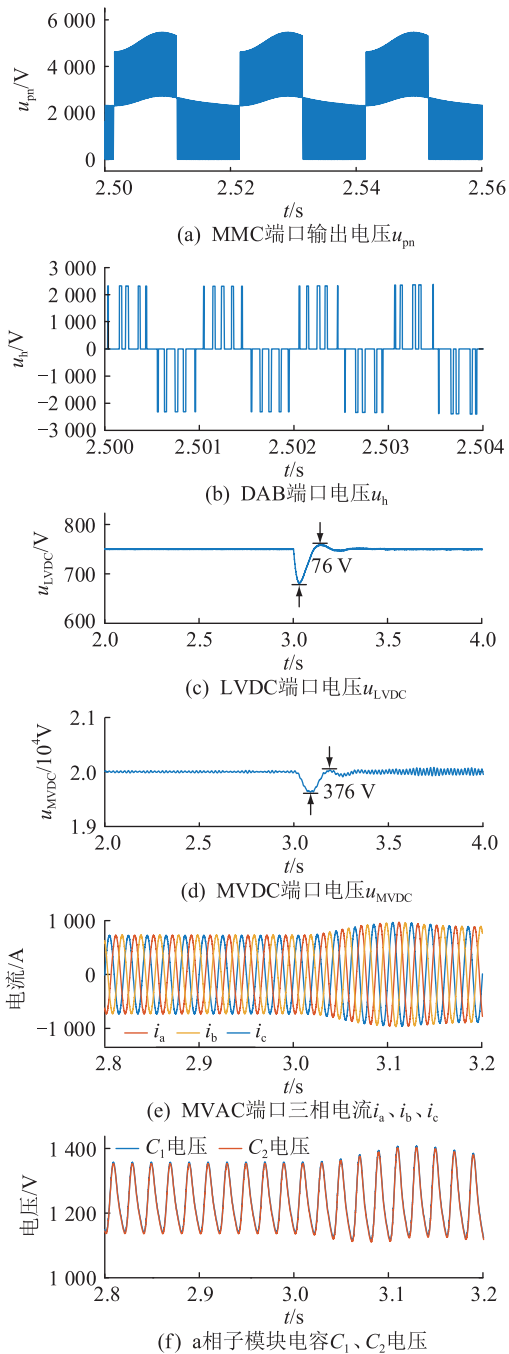


图9 正常工况下的仿真结果

Fig.9 Simulation results under normal working condition

由图 10 可知,直流侧稳态电流约为 250 A,电压为 20 kV。故障发生后,直流侧电压跌落至 0,直流电流在短时间内上升到 887 A 左右,交流电流和桥臂电流随之增大。大约 2.6 ms 后,直流侧电流在所有 IGBT 被阻断的情况下流过电容后迅速下降到 0,交流侧电流和桥臂电流也随之下降为 0,说明子模块闭锁会阻断交流侧向直流侧馈入能量,故障发生后电容的反向电压使二极管不再具有续流能力,因此交流侧电流和桥臂电流迅速降至 0,故文中所提 CSPI 型 MMC-SST 拓扑及相应的控制方法可清除

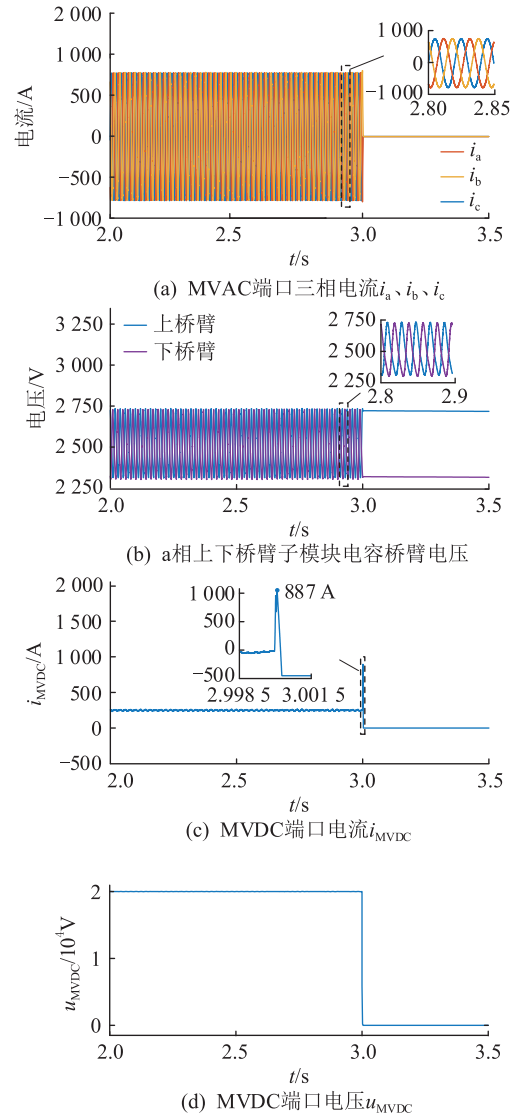


图 10 直流短路故障工况下的仿真结果

Fig.10 Simulation results when DC short-circuit fault occurs

直流短路故障。

5 结论

针对传统 DAB 型 MMC-SST 开关器件过多的问题,文中提出一种具备故障清除能力的 CSPI 型 MMC-SST 拓扑,并针对其结构特点提出一种基于共模、差模解耦原理的混频调制方法。通过仿真验证了所提拓扑及控制方法的有效性,主要结论如下:

(1) 文中所提 CSPI 型 MMC-SST 拓扑与传统 DAB 型 MMC-SST 拓扑相比,利用输入级 MMC 的结构,通过开关对复用,大量减少了开关器件数目。

(2) 文中所提 CSPI 型 MMC-SST 拓扑与 HBSM 型 MMC-SST 拓扑相比,可以在提高 MMC-SST 功率密度的同时具备直流短路故障清除能力,供电可靠性更高。

致谢

本文得到江苏省高校自然科学基金面上项目(22KJB470005)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 王宇鹏,蒋哲,武诚,等. 基于直流短路比的交直流系统送端暂态过电压评估指标研究[J]. 智慧电力,2023,51(12):8-14,22.
WANG Yupeng,JIANG Zhe,WU Cheng,et al. Evaluation index of transient overvoltage in AC/DC sending-end system based on DC short-circuit ratio [J]. Smart Power, 2023, 51 (12): 8-14,22.
- [2] 龚逊东,费有蝶,凌佳凯,等. 基于深度神经网络伪量测建模的交直流混合配电网交替迭代法状态估计[J]. 电力建设,2022,43(10):111-120.
GONG Xundong,FEI Youdie,LING Jiakai,et al. Alternating-iteration state estimation of AC/DC hybrid distribution system based on pseudo-measurement modeling using deep neural network[J]. Electric Power Construction,2022,43(10):111-120.
- [3] 耿世平,余敏,郭晓鹏,等. 基于柔性变电站的交直流配电技术经济评估[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(1):140-150.
GENG Shiping,YU Min,GUO Xiaopeng,et al. Technical and economic evaluation of AC and DC distribution based on flexible substation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(1):140-150.
- [4] 侯磊,常征,蔡毅,等. 基于 Romberg 积分算法的直流配电网电能计量方法[J]. 电测与仪表,2023,60(5):186-192.
HOU Lei,CHANG Zheng,CAI Yi,et al. Electric energy metering method of DC distribution network based on Romberg integral algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(5):186-192.
- [5] 朱建昆,高红均,贺帅佳,等. 考虑 VSC 与光-储-充协同配置的交直流混合配电网规划[J]. 智慧电力,2023,51(11):7-14.
ZHU Jiankun,GAO Hongjun,HE Shuaijia,et al. AC-DC hybrid distribution network planning considering VSC and photovoltaic-storage-charging coordinated configuration [J]. Smart Power, 2023,51(11):7-14.
- [6] KOLLI N,PARASHAR S,KOKKONDA R K,et al. A study on the evolution of solid state transformer technologies and applications[C]//2023 11th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2023-ECCE Asia). IEEE,2023:126-134.
- [7] 孙汝羿,袁至,王维庆,等. 含固态变压器新型配电网动态无功多目标优化[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(16):104-114.
SUN Ruyi,YUAN Zhi,WANG Weiqing,et al. Multi-objective optimization of dynamic reactive power in a new distribution network with a solid state transformer[J]. Power System Protection and Control,2023,51(16):104-114.
- [8] 张文杰,吕世轩,高启璋,等. 基于固态变压器的交直流混合配电系统协调运行控制策略[J]. 电力建设,2023,44(4):103-112.
ZHANG Wenjie,LÜ Shixuan,GAO Qixuan,et al. Coordinated operation control strategy of AC/DC hybrid distribution system based on solid-state transformer [J]. Electric Power Construction,2023,44(4):103-112.
- [9] 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.
- [10] 程静,赵振民. 基于虚拟同步发电机的固态变压器交流端口柔性控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(4):138-147.
CHENG Jing,ZHAO Zhenmin. Flexible control strategy for a solid-state transformer AC port based on a virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control,2023,51(4):138-147.
- [11] 郭慧,丁峰,任林涛,等. 基于固态变压器的有源配电网自适应模式切换与功率管理[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(3):89-98.
GUO Hui,DING Feng,REN Lintao,et al. Adaptive mode switching and power management of a solid-state transformer-based active distribution network[J]. Power System Protection and Control,2023,51(3):89-98.
- [12] 李子欣,高范强,徐飞,等. 中压配电网用 10kVac-750Vdc/1MVA 电力电子变压器功率密度影响因素研究[J]. 电工电能新技术,2016,35(6):1-6.
LI Zixin,GAO Fanqiang,XU Fei,et al. Power density analysis of 10kVac-750Vdc/1MVA power electronic transformer/solid-state transformer for medium voltage distribution grid[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2016,35(6):1-6.
- [13] ZHANG J P,LIU J Q,YANG J X,et al. A modified DC power electronic transformer based on series connection of full-bridge converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2019,34(3):2119-2133.
- [14] 马大俊,陈武,薛晨炀,等. 低压直流母线 AC-DC 电力电子变压器及其短路故障穿越方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(8):158-166.
MA Dajun,CHEN Wu,XUE Chenyang,et al. AC-DC power electronic transformer with low-voltage DC bus and strategy of short-circuit fault ride-through [J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(8):158-166.
- [15] 刘兴华. ISOP 结构的双向隔离 DC/DC 电力电子变压器[J]. 电力电子技术,2022,56(12):32-36.
LIU Xinghua. Bidirectional isolation DC/DC power electronics transformer with ISOP structure [J]. Power Electronics,2022,56(12):32-36.
- [16] 赵伟,袁至,王维庆,等. 考虑电能质量优化的 MMC-SST 输入级控制策略[J]. 电力工程技术,2022,41(6):211-

- 220,238.
- ZHAO Wei, YUAN Zhi, WANG Weiqing, et al. MMC-SST input-level control strategy considering power quality optimization [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(6):211-220,238.
- [17] SADAT A R, KRISHNAMOORTHY H S. Fault-tolerant ISOSP solid-state transformer for MVDC distribution [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(6):6985-6996.
- [18] 高范强, 李子欣, 李耀华, 等. 面向交直流混合配电应用的 10 kV-3 MV·A 四端口电力电子变压器 [J]. *电工技术学报*, 2021, 36(16):3331-3341.
- GAO Fanqiang, LI Zixin, LI Yaohua, et al. 10 kV-3 MV·A four-port power electronic transformer for AC-DC hybrid power distribution applications [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(16):3331-3341.
- [19] TENG J X, SUN X F, PAN Y Z, et al. An inductive-filtering strategy of submodule ripple-power in triple-port MMC-based SST applied to hybrid medium and low voltage AC/DC interface [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(7):8015-8032.
- [20] ZHOU J Q, ZHANG J W, WANG J C, et al. Design and control of power fluctuation delivery for cell capacitance optimization in multiport modular solid-state transformers [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(2):1412-1427.
- [21] 章一新, 张建文, 施刚, 等. 一种中压直流短路故障下不间断运行的 MMC-SST 拓扑及控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(6):2267-2277.
- ZHANG Yixin, ZHANG Jianwen, SHI Gang, et al. Topology and control strategy for an MMC-SST with uninterrupted power supply capability under medium voltage DC short circuit fault [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(6):2267-2277.
- [22] 殷展, 杜仁平, 姜黎明, 等. 适用于配电网互联的内联式 MMC 型固态变压器 [J]. *可再生能源*, 2021, 39(10):1387-1393.
- YIN Zhan, DU Renping, JIANG Liming, et al. Interlink MMC based solid state transformer for distribution grid interconnection [J]. *Renewable Energy Resources*, 2021, 39(10):1387-1393.
- [23] PEI Z C, KONG D H, LIU C, et al. Hybrid isolated modular multilevel converter based solid-state transformer topology with simplified power conversion process and uneven voltage ratio [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(10):12757-12773.
- [24] 戴志辉, 刘雪燕, 何永兴, 等. 基于 CDSM-MMC 的光伏直流接入系统故障分析 [J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(19):14-22.
- DAI Zhihui, LIU Xueyan, HE Yongxing, et al. DC-fault analysis on CDSM-MMC based PV integration system [J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(19):14-22.
- [25] 李帅, 郭春义, 赵成勇, 等. 一种具备直流故障穿越能力的低损耗 MMC 拓扑 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(23):6801-6810, 7071.
- LI Shuai, GUO Chunyi, ZHAO Chengyong, et al. A novel MMC topology with lower power loss and DC fault ride-through capability [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(23):6801-6810, 7071.
- [26] 王朝亮, 许建中, 赵成勇, 等. 基于单箝位型子模块的 MMC 及拓扑改进方案 [J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(9):74-80.
- WANG Chaoliang, XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, et al. MMC based on single-clamp sub-module and improved topology schemes [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(9):74-80.
- [27] 王琛, 谭开东, 王毅, 等. 具备直流故障清除和自均压能力的 MMC 移位全桥子模块拓扑 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(24):151-160.
- WANG Chen, TAN Kaidong, WANG Yi, et al. Topology of MMC oblique-connection full-bridge sub-module with capability of DC fault clearing and voltage self-balancing [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(24):151-160.
- [28] PENG C, LI R. A low conduction loss modular multilevel converter topology with DC fault blocking capability and reduced capacitance [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2020, 67(7):1299-1303.
- [29] 陈静, 赵涛, 徐友, 等. 一种量化误差可控的少子模块 MMC 混合调制策略 [J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(3):105-113.
- CHEN Jing, ZHAO Tao, XU You, et al. A hybrid modulation strategy for MMC with controllable quantization error [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(3):105-113.
- [30] 王振浩, 赵家婧, 成龙, 等. 具有直流故障清除能力的主动接地式模块化多电平换流器 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(7):145-152.
- WANG Zhenhao, ZHAO Jiajing, CHENG Long, et al. Active-grounded modular multilevel converter with DC fault clearing capability [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(7):145-152.
- [31] 史明明, 刘瑞煌, 袁宇波, 等. 配电网混合型 MMC 双极短路故障后快速恢复策略 [J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(5):121-128.
- SHI Mingming, LIU Ruihuang, YUAN Yubo, et al. Rapid recovery after bipolar short-circuit fault of hybrid MMC in distribution network [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(5):121-128.
- [32] 王振浩, 刘婕, 李国庆, 等. 采用桥臂电抗器耦合的 MMC 直流侧故障过电流抑制新方法 [J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(17):9-15.
- WANG Zhenhao, LIU Jie, LI Guoqing, et al. A new method of over current suppression based on coupled bridge arm reactors for DC faults of modular multilevel converters [J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(17):9-15.
- [33] 鄢寅宇, 孙毅超, 郭宛鑫, 等. 具备直流短路故障阻断能力的子模块桥臂复用型模块化多电平固态变压器 [J]. *电网*

技术,2024,48(3):1224-1234.

YAN Yinyu, SUN Yichao, GUO Wanxin, et al. Modular multi-level solid state transformer with DC short circuit fault blocking capability with arm integrated submodule [J]. Power System Technolog, 2024, 48(3): 1224-1234.

[34] 李笑倩, 刘文华, 杨文博, 等. 基于半压钳位子模块的 MMC 直流短路故障穿越研究[J]. 电源学报, 2015, 13(6): 1-8.

LI Xiaoqian, LIU Wenhua, YANG Wenbo, et al. Research on DC-fault ride through of MMC using half-voltage clamp submodule [J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(6): 1-8.

[35] YAN Y Y, SUN Y C, GUO W X, et al. A novel modular multi-level converter based power electronic transformer with inte-

grated switching pairs [C]//2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit, MI, USA. IEEE, 2022: 1-8.

作者简介:



郭宛鑫

郭宛鑫(1998),女,硕士在读,研究方向为模块化多电平换流器建模、控制及其在电力系统中的应用(E-mail:419005279@qq.com);

孙毅超(1987),男,博士,副教授,研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用;

鄢寅宇(1996),男,博士在读,研究方向为模块化多电平变换器先进拓扑建模及控制。

Modular multi-level converter solid-state transformer based on the clamped switch pair integrated submodule

GUO Wanxin, SUN Yichao, YAN Yinyu, ZHANG Yifan

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: Modular multi-level converter based solid-state transformer (MMC-SST) has gained wide attention in AC-DC hybrid distribution network due to the availability of ports with multiple voltage levels and voltage patterns. Dual active bridge (DAB)-type MMC-SST has problems such as low power density and high cost, and the traditional half bridge structure of DAB-type MMC-SST has failure to clear fault current in case of short-circuit faults at medium voltage direct current (MVDC) ports, which affects its application in distribution network. Although full bridge structure of DAB-type MMC-SST has fault blocking capability, it also increases the number of switches. Improve the topology of the traditional DAB-type MMC-SST, then a clamped switch pair integrated submodule (CSPI)-type MMC-SST topology is proposed based on the principle of frequency mixing modulation. The proposed topology not only reduces the number of switching devices but also makes the SST have the capability of clearing MVDC short-circuit faults, as compared to the traditional half bridge and full bridge DAB-type MMC-SST topologies. The power density and power supply reliability of the DAB-type MMC-SST are greatly improved by the proposed topology. The feasibility of the proposed CSPI-type MMC-SST topology and frequency decoupling method is verified through theoretical analysis and simulation.

Keywords: modular multi-level converter (MMC); solid state transformer (SST); clamped switch pair integrated submodule (CSPI); DC short circuit fault clearance; hybrid frequency modulation; frequency decoupling

(编辑 吴楠)