

集成直流故障换流电路的改进型混合 MMC

梁桢¹,王勇¹,白海滨¹,张志宇¹,孙谦浩²,崔彬²

(1. 国网新疆电力有限公司昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100;

2. 清华大学 电机系, 北京 100084)

摘要: 基于全桥(FB)与半桥(HB)子模块的传统混合式模块化多电平换流器(MMC)是典型的具有直流故障清除能力的MMC。然而,常规混合MMC中FB占比通常大于50%,增加了成本与损耗。鉴于此,为了减少混合MMC中FB的数量,提出一种集成晶闸管开关电容直流故障换流电路的改进型混合MMC。所提MMC中HB-MMC与FB-MMC均保留了各自完整的主体,并在交流侧采用三绕组变压器进行连接,在直流侧进行串联连接。同时,由于直流侧集成了一个基于晶闸管的开关电容结构,所提MMC能够实现直流故障的清除。研究表明,所提MMC中FB占比可降低至10%~25%,甚至更低(限于交流电压的波形),在降低换流器成本的同时降低了通态损耗。仿真结果验证了分析的正确性。

关键词: 晶闸管开关电容;直流故障换流电路;混合型MMC;直流故障清除策略;串联型换流器

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24308

Improved Hybrid MMC Integrated with DC Fault Commutated Circuit

LIANG Zhen¹, WANG Yong¹, BAI Haibin¹, ZHANG Zhiyu¹, SUN Qianhao², CUI Bin²

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. Changji Power Supply Company, Changji 831100, Xinjiang, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on full-bridge (FB) and half-bridge (HB) sub-modules (SMs), the conventional hybrid modular multilevel converter (MMC) is a typical topology of MMC with DC fault clearing ability. However, the proportion of FB SMs in conventional hybrid MMC is usually greater than 50%, so as to increase the cost and losses. To solve this mentioned issue, a DC fault commutated circuit based on thyristor-switched capacitor (TSC) structure in the hybrid MMC was integrated to reduce the number of FBs, the improved TSC-hybrid MMC was proposed in follows. In TSC-hybrid MMC, HB-MMCs and FB-MMCs were both retained their complete commutated body, and meanwhile, they were connected by a three-winding transformer in AC side and in series with DC side. In particular, a thyristor-switched capacitor structure was integrated in the DC side of TSC-hybrid MMC to clear the DC fault. According to the analysis, the proportion of FB SMs in TSC-hybrid MMC can be reduced to 10%~25% or even lower (the AC-side voltage quality is a main limiting condition), the cost is reduced as well as the on-state losses. Simulation results validate the correctness of analyses.

Key words: thyristor-switched capacitor (TSC); DC fault commutated circuit; hybrid modular multilevel converter (MMC); DC fault clearing strategy; series converter

由于在远、超远距离输电领域具有明显优势,高压直流输电^[1-2]是新疆地区实施大规模“疆电外送”、有力促进新疆能源基地集约化开发的关键技术。在高压直流输电领域,由于具有有功、无功独立控制及模块化程度高等优点^[3],基于MMC的柔性直流输电系统被认为是未来电网实

现变革的关键^[4]。随着直流工程电压等级与容量的不断提高与发展^[5],采用架空线的柔性直流技术目前已成为学术界的研究热点^[6-7]。

在基于架空线的柔性直流系统中,实现直流故障的清除是其关键技术^[8]。然而,工程常用的半桥(half-bridge, HB)型MMC由于子模块(sub-

基金项目: 中国博士后科学基金(2022M711762);国家自然科学基金(52007097)

作者简介: 梁桢(1983—),男,硕士,副高级工程师,主要研究方向为交、直流输配电技术及电网规划,Email: xjliangzhen@163.com

通讯作者: 孙谦浩(1993—),男,博士,助理研究员,主要研究方向为FACTS、直流输配电技术及大功率电力电子换流器技术,Email: sxsunqianhao@163.com

modules, SMs)中并联二极管的续流作用,需要直流断路器^[9]与限流电抗器(甚至电力电子型主动故障限流器)的配合才能实现对直流故障电流的清除^[10]。上述直流故障清除方案目前仍面临着以下挑战:一方面,高压直流断路器技术目前仍在不断发展,其使用很大程度上将增加柔性直流工程的占地面积和建设成本^[11];另一方面,已有研究表明限流电抗器^[12]的使用会延长故障电流清除时间、降低柔直站响应速度,严重时甚至会引起系统振荡^[13],且随着传输容量的提升,限流电抗器的电感值也必须随之增加,但大电感的制造目前仍存在一定的困难^[14]。电力电子型主动故障限流器虽然能够有效解决限流电抗器的上述问题,但目前仍处于理论研究阶段^[13-14],且主动故障限流器的使用必然进一步增加柔直系统的成本与功率损耗。

在此情况下,对HB-MMC进行拓扑改进来实现直流故障清除便成为了MMC领域的另一主要研究课题^[15]。文献[16]将直流断路器集成到了HB型MMC中,从而有效实现了MMC对直流故障的清除。然而,该方案的故障清除时间较长,且由于采用了基于IGBT串联的辅助电力电子开关组件,增加了实际工程的实现难度。文献[17-18]提出了采用全桥(full-bridge, FB)子模块代替HB子模块来组建MMC的方案,但FB型MMC的造价以及通态损耗都较大。文献[19-20]提出将FB子模块引入HB型MMC的每个桥臂中,从而形成了常规的混合型MMC方案,该方案在具有直流故障自清除能力的同时,一定程度上减小了MMC的建设成本与通态损耗。但根据已有研究成果,常规混合型MMC要实现直流故障的自清除,其每个桥臂中FB子模块的占比应高于50%,使得其成本与通态损耗仍有一定程度上的优化可能。

基于上述背景,本文对常规混合MMC的成本与损耗进行进一步优化,提出了一种集成晶闸管开关电容(thyristor-switched capacitor, TSC)直流故障换流电路的改进型混合MMC(TSC-hybrid MMC),并对该混合MMC的稳态与故障处理进行了详细的研究,具体内容如下文所述。

1 TSC-hybrid MMC拓扑及控制

1.1 TSC-hybrid MMC拓扑分析

所提TSC-hybrid MMC的拓扑如图1所示。TSC-hybrid MMC的交流侧连接在一个标么变比

为 $1:k_1:k_2$ ($k_1+k_2=1$)的三绕组变压器上,换流主体由一个完整HB-MMC与一个完整FB-MMC在直流侧串联组成。其中,变比 $k_1:k_2$ 一方面决定了TSC-hybrid MMC中HB-MMC与FB-MMC的交、直流侧电压,另一方面决定了二者的子模块个数。在应用场景确定时,由于TSC-hybrid MMC的交、直流电压一定, $k_1:k_2$ 的取值将与TSC-hybrid MMC中HB与FB的占比以及交流侧的波形质量密切相关,是影响TSC-hybrid MMC整体构建经济性的关键因素。同时,为实现对直流故障的清除,TSC-hybrid MMC在内部FB-MMC的直流侧集成了一个晶闸管开关电容结构,并设置了相应的配合隔离开关1与开关2。TSC-hybrid MMC稳态运行时,该电路并不工作;当直流侧发生故障时,该电路将串联到故障电路中,对HB-MMC的故障电流进行吸收与阻断。

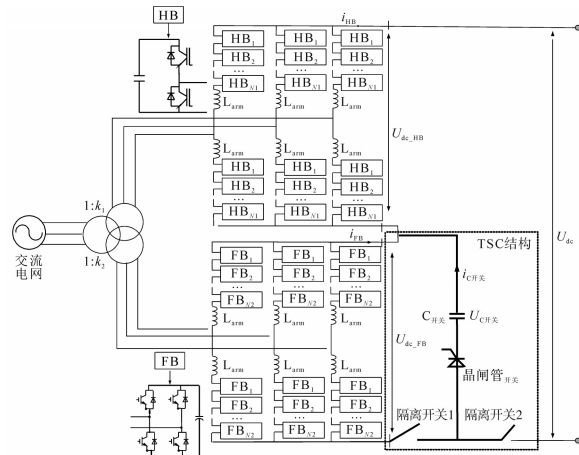


图1 TSC-hybrid MMC拓扑

Fig.1 Topology of TSC-hybrid MMC

1.2 TSC-hybrid MMC控制策略及关键参数设计

1.2.1 稳态控制

稳态运行时,隔离开关1与2均处于连通状态,TSC-hybrid MMC中HB-MMC与FB-MMC分别独立控制自身的直流电压,并通过串联的连接结构自然控制TSC-hybrid MMC的直流电压。在稳态运行时,TSC-hybrid MMC中直流侧主要电压与电流存在以下关系:

$$\begin{cases} U_{dc} = U_{dc_HB} + U_{dc_FB} \\ i_{dc} = i_{dc_HB} = i_{dc_FB} \\ i_{C\text{开关}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_{dc} 为TSC-hybrid MMC直流侧整体电压; U_{dc_HB} , U_{dc_FB} 分别为TSC-hybrid MMC中HB-MMC和FB-MMC的直流侧电压; i_{dc} 为TSC-hybrid MMC直流侧整体电流; i_{dc_HB} , i_{dc_FB} 分别为TSC-hybrid

MMC中HB-MMC和FB-MMC的直流侧电流; $i_{C\text{开关}}$ 为开关电容电流。

根据柔直工程的设计经验^[1,12],TSC-hybrid MMC的内部参数具有下列关系:

$$\begin{cases} U_{ac_HB} = 0.5U_{dc_HB} \\ U_{ac_FB} = 0.5U_{dc_FB} \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_{ac_HB} 、 U_{ac_FB} 分别为TSC-hybrid MMC中HB-MMC和FB-MMC的三相交流电压有效值。

基于式(1)、式(2),可得如下关系式:

$$\begin{cases} \frac{U_{dc_HB}}{U_{dc}} = \frac{P_{dc_HB}}{P} = \frac{k_1}{k_2 + k_1} \\ \frac{U_{dc_FB}}{U_{dc}} = \frac{P_{dc_FB}}{P} = \frac{k_2}{k_2 + k_1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{dc_HB} 、 P_{dc_FB} 分别为TSC-hybrid MMC中HB-MMC和FB-MMC的传输功率; P 为TSC-hybrid MMC的整体传输功率。

基于式(3),TSC-hybrid MMC的稳态控制中,HB-MMC与FB-MMC两部分的有功量参考值计算为

$$\begin{cases} U_{dc_HB}^* = \frac{k_1}{k_2 + k_1} U_{dc}^* \\ U_{dc_FB}^* = \frac{k_2}{k_2 + k_1} U_{dc}^* \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} P_{dc_HB}^* = \frac{k_1}{k_2 + k_1} P^* \\ P_{dc_FB}^* = \frac{k_2}{k_2 + k_1} P^* \end{cases} \quad (4)$$

式中: $U_{dc_HB}^*$ 、 $U_{dc_FB}^*$ 分别为TSC-hybrid MMC中HB-MMC和FB-MMC的直流侧电压参考值; U_{dc}^* 为TSC-hybrid MMC的整体直流电压参考值; $P_{dc_HB}^*$ 、 $P_{dc_FB}^*$ 分别为TSC-hybrid MMC中HB-MMC和FB-MMC的有功参考值; P^* 为TSC-hybrid MMC的整体有功参考值。

同时,TSC-hybrid MMC中HB-MMC与FB-MMC的无功量也可以分别独立进行相应的控制。

式(3)同样反映了TSC-hybrid MMC中FB与HB模块的占比关系,如下式所示:

$$\begin{cases} \frac{N_1}{N_1 + N_2} = \frac{k_1}{k_2 + k_1} \\ \frac{N_2}{N_1 + N_2} = \frac{k_2}{k_2 + k_1} \end{cases} \quad (5)$$

式中: N_1 为TSC-hybrid MMC中HB的个数; N_2 为TSC-hybrid MMC中FB的个数。

(N_1+N_2) 的设计与常规HB-MMC相同。

1.2.2 故障清除控制

图2为不同状态下的TSC-hybrid MMC运行示意图。

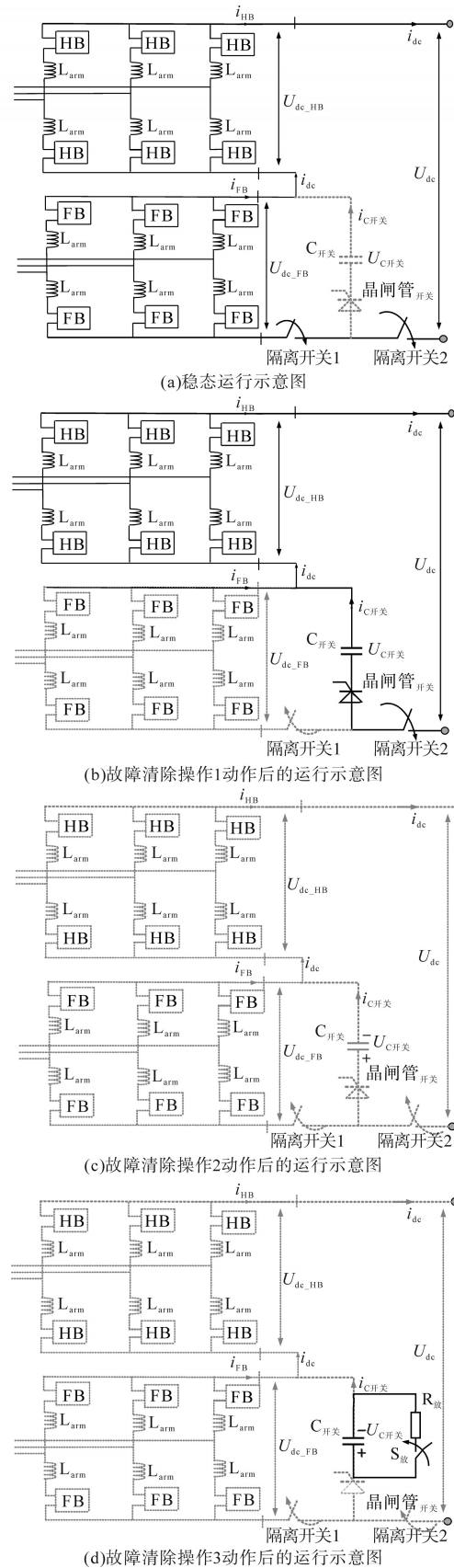


图2 不同状态下的TSC-hybrid MMC运行示意图

Fig.2 Schematic of TSC-hybrid MMC at different operating states

TSC-hybrid MMC的稳态状态如图2a所示,

HB-MMC与FB-MMC两个换流主体均正常进行功率传输。当直流侧出现短路故障时,TSC-hybrid MMC的直流电压迅速下降,直流电流迅速增大,从而引起保护动作。假设TSC-hybrid MMC的直流侧故障出现在 t_0 时刻,且 t_1 时刻保护系统发生动作。之后,具体的操作时序如下:

操作1: t_1 时刻,闭锁TSC-hybrid MMC中的所有HB与FB子模块,并触发晶闸管开关电容结构中的晶闸管使故障电流流入开关电容故障换流电路,利用开关电容吸收故障电流能量。

该步骤完成后,由于HB的二极管续流作用,TSC-hybrid MMC中HB-MMC的交流侧仍为直流故障点提供故障能量,且故障电流将通过晶闸管为开关电容充电,使开关电容的电压升高;同时,由于FB的反向电容电压作用,TSC-hybrid MMC中FB-MMC的交流侧将停止为直流故障点提供能量,其相应的直流电流 i_{FB} 将降为0,继而打开隔离开关1(t_2 时刻),具体的状态如图2b所示。

由于开关电容电压 $U_{\text{开关电容}}$ 会降低TSC-hybrid MMC中FB-MMC的反向电压, t_2 时刻,为保证隔离开关1能被正常打开,开关电容的电压应保证TSC-hybrid MMC中FB-MMC的闭锁回路中仍存在反向电压。考虑到 t_1-t_2 期间,TSC-hybrid MMC中阻断电压 $U_{\text{阻断}}$ 与反向电压 $U_{\text{反向}}$ 分别为

$$\begin{cases} U_{\text{阻断}} = 4k_2 U_{\text{ac}} / (k_2 + k_1) \\ U_{\text{反向}} = U_{\text{开关电容}} + \sqrt{2} k_2 U_{\text{ac}} / (k_2 + k_1) \end{cases} \quad (6)$$

式中: U_{ac} 为TSC-hybrid MMC的交流侧的整体电压。

开关电容 $C_{\text{开关}}$ 的取值应满足:

$$\frac{1}{C_{\text{开关}}} \int_{t_1}^{t_2} i_{\text{dc}}(t) dt \leq (4 - \sqrt{2}) \frac{k_2 U_{\text{ac}}}{k_2 + k_1} \quad (7)$$

假设 t_1-t_2 期间的故障电流为恒值 $I_{\text{dc,F}}$,则

$$C_{\text{开关}} \geq \frac{I_{\text{dc,F}}(t_2 - t_1)(k_2 + k_1)}{(4 - \sqrt{2})k_2 U_{\text{ac}}} \quad (8)$$

式(7)与式(8)限制了开关电容的最小取值。

操作2:随着直流故障电流对开关电容的充电,开关电容的电压逐渐上升,当电容的电压等于或大于TSC-hybrid MMC中HB-MMC的交流电压峰值时,HB-MMC的二极管续流作用将会停止,故障电流逐渐降为0,继而闭锁晶闸管,断开隔离开关2(t_3 时刻),具体状态如图2c。

在操作1与操作2完成之后,故障换流电路中开关电容的电压临界值 $V_{\text{C开关}}$ 为

$$V_{\text{C开关}} = \sqrt{2} k_1 U_{\text{ac}} / (k_2 + k_1) \quad (9)$$

基于式(8)可知,对于相同的故障电流,由于故障换流电路的开关电容电压临界值相同,开关电容值越大,故障清除过程所需要的时间越长,故障电流的最大值将越大,对TSC-hybrid MMC中HB-MMC的反并联二极管及晶闸管的最大通流能力要求就越强。因此,考虑二极管通流能力的限制,结合式(7),通常可选取开关电容为

$$C_{\text{开关}} = \beta \frac{I_{\text{dc,F}}(t_2 - t_1)(k_2 + k_1)}{(4 - \sqrt{2})k_2 U_{\text{ac}}} \quad (10)$$

式中: β 为开关电容选取系数。

操作3:直流故障清除后,为了下一次直流故障时晶闸管开关电容结构能够正常运行,需要对开关电容进行放电操作。如图2d所示,采用工程上常用的电阻放电电路对开关电容进行放电,放电电阻 $R_{\text{放}}$ 与开关电容电压的关系为

$$V_{\text{C开关}}(t) = \sqrt{2} \frac{k_1 U_{\text{ac}}}{k_2 + k_1} e^{-t/(R_{\text{放}} C_{\text{开关}})} \quad (11)$$

根据式(11)及实际工程中所需要的放电常数要求,可以确定TSC-hybrid MMC中放电电阻的电阻值。当电容放电完成后,开关电容的电压降为0,放电回路中的电流也将降为0。此后,打开隔离开关 $S_{\text{放}}$,使TSC-hybrid MMC恢复到重启的预备阶段,等待上级控制系统的重启命令,完成对直流故障的清除。

1.2.3 TSC-hybrid MMC中晶闸管与开关电容的耐压设计

稳态时,TSC-hybrid MMC中的晶闸管断态耐压为FB-MMC的稳态直流电压;故障清除时,晶闸管的断态耐压最大值为TSC-hybrid MMC中HB-MMC的交流侧电压峰值。即,在TSC-hybrid MMC的整个运行中,晶闸管的最大断态耐压为

$$\begin{aligned} V_{\text{断态耐压_晶闸管}} &= \max \left\{ k_2 U_{\text{dc}} / (k_2 + k_1), \frac{1}{\sqrt{6}} k_1 U_{\text{dc}} / (k_2 + k_1) \right\} \\ &= \max \left\{ k_2, \frac{1}{\sqrt{6}} k_1 \right\} \cdot U_{\text{dc}} / (k_2 + k_1) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\max\{x, y\}$ 的输出为 x 与 y 中的较大值。

基于式(12),将单个晶闸管开关的耐压值表示为 $V_{\text{断态耐压_晶闸管单元}}$,则晶闸管开关需要串联的晶闸管单元数目可以计算为

$$\begin{aligned} N_{\text{晶闸管}} &= \text{round} \left[\alpha_{\text{安全}} V_{\text{断态耐压_晶闸管单元}} / V_{\text{断态耐压_晶闸管}} \right] \\ &= \text{round} \left[\max \left\{ k_2, \frac{1}{\sqrt{6}} k_1 \right\} \frac{\alpha_{\text{安全}} U_{\text{dc}}}{(k_2 + k_1) V_{\text{断态耐压_晶闸管单元}}} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $\alpha_{\text{安全}}$ 为大于1的常数,表示工程安全系数,通常取为1.1; $\text{round}[\]$ 为向上取整函数。

相似地,TSC-hybrid MMC中的开关电容最大耐压为HB-MMC的交流侧电压峰值,即

$$V_{\text{耐压_开关电容}} = \frac{k_1 U_{\text{dc}}}{\sqrt{6} (k_2 + k_1)} \quad (14)$$

根据式(12)~式(14)的计算结果,即可对TSC-hybrid MMC中晶闸管与开关电容的耐压进行合理的选择与设计。

2 验证结果分析

2.1 基于Matlab/Simulink的验证结果

为了对TSC-hybrid MMC进行验证,在Matlab中搭建了算例。其中,TSC-hybrid MMC中HB-MMC每桥臂含180个模块,FB-MMC每桥臂含20个模块,即TSC-hybrid MMC的每个桥臂等效模块数为200个,具体参数设置如下:TSC-hybrid MMC

额定容量500 MW;TSC-hybrid MMC中HB-MMC结构额定容量450 MW;TSC-hybrid MMC中FB-MMC结构额定容量50 MW;TSC-hybrid MMC额定直流电压320 kV;TSC-hybrid MMC中HB-MMC结构额定直流电压288 kV;SC-hybrid MMC中FB-MMC结构额定直流电压32 kV;子模块额定电压1 600 V;晶闸管单元耐压8 kV;TSC-hybrid MMC中HB-MMC额定交流电压有效值144 kV;TSC-hybrid MMC中FB-MMC额定交流电压有效值16 kV;交流电网额定线电压有效值160 kV;桥臂电抗 $L_{\text{HB}}=54 \text{ mH}$, $L_{\text{FB}}=6 \text{ mH}$;子模块电容值10 mF;1: k_1 : $k_2=1:0.9:0.1$;晶闸管开关电容故障换流电路的电容50 μF ;晶闸管开关需要串联的个数17。其中,开关电容值根据式(9)进行计算, β 取值为1.02, (t_2-t_1) 取值为1 ms,故障电流 $I_{\text{dc_F}}$ 取值为1.3倍的额定直流电流。

图3为基于Matlab/Simulink的仿真结果图。

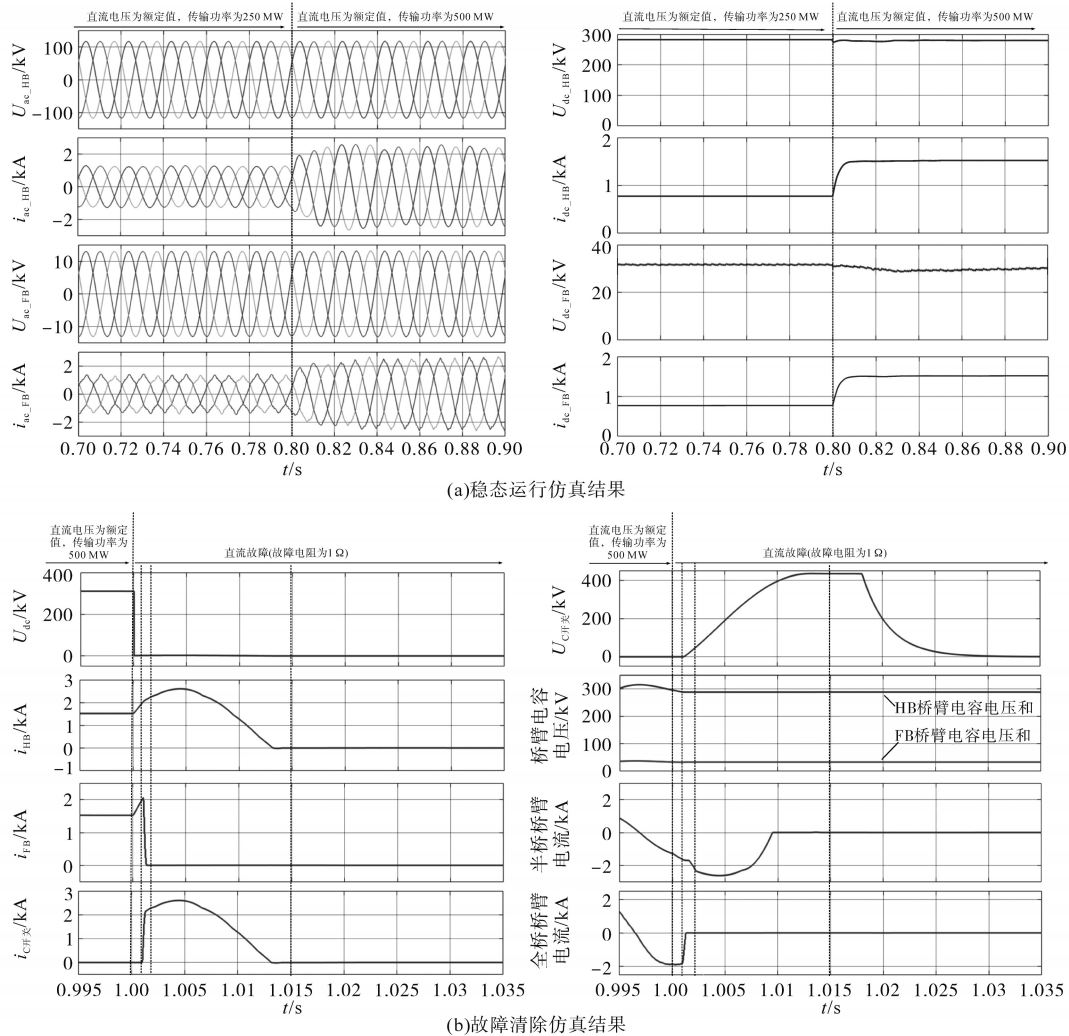


图3 基于Matlab/Simulink的仿真结果

Fig.3 Simulation results based on Matlab/Simulink

图3a给出了TSC-hybrid MMC稳态运行时的结果,其中,TSC-hybrid MMC的工作状态为定直流电压的额定状态。0.8 s之前,系统的传输功率为250 MW;0.8 s后,系统的传输功率为500 MW。由仿真可知,无论是250 MW还是500 MW,TSC-hybrid MMC中HB-MMC的稳态直流电压均为288 kV,FB-MMC的稳态直流电压均为32 kV,且两部分的直流电流均稳定在781 A与1 562 A,验证了TSC-hybrid MMC稳态运行的正确性。同时,结合图3b的结果可知,晶闸管开关电容电路中的电流在稳态时为0,开关电容的电压也为0,验证了理论分析的正确性。

如图3b所示,给出了TSC-hybrid MMC的直流故障清除结果。1 s(t_0)时,系统发生双极故障(故障电阻为1 Ω),随后,TSC-hybrid MMC的直流电压迅速下降,直流电流迅速上升。1 ms后(t_1),系统检测到直流故障,进行操作1,闭锁TSC-hybrid MMC中的HB-MMC与FB-MMC,触发故障专用晶闸管。此后,FB-MMC由于FB的反压作用,直流电流迅速降为0,在故障发生2 ms后(t_2),断开隔离1,完成FB-MMC的直流故障处理;HB-MMC则由于二极管的作用,通过专用晶闸管向开关电容充电,开关电容电压逐渐上升。当电容电压上升到大于HB-MMC的交流线电压峰值时,二极管续流消失,此后故障回路中的剩余电感残留能量继续为开关电容充电,直至故障电路电流为0,故障发生15 ms后(t_3)闭锁晶闸管,断开隔离开关2,完成操作2。之后,故障发生18 ms后,进行操作3,闭合 $S_{放}$,对开关电容进行放电,故障发生30 ms后,完成对开关电容的放电,断开 $S_{放}$,TSC-hybrid MMC恢复正常,完成故障清除。

2.2 基于RT-LAB的硬件在环验证结果

采用RT-LAB平台对TSC-hybrid MMC进行硬件在环验证。其中,验证平台基于OP5600,仿真步长取50 μ s,具体结果如图4所示。

对比图4与图3,二者基本一致。同时,由于在RT-LAB中TSC-hybrid MMC需要通过DPL线路模块进行分割,而DPL模块本身具有电感参数,因此图4与图3的故障处理情况存在略微的差别。如FB模块的最大电流在图4b中不足2 kA,与图3b中的结果有略微的不一致;图4b的直流电压跌落为0后存在小的波动才降为0等,上述不一致是RT-LAB中的主电路分割造成的,但并不影响其正确性。

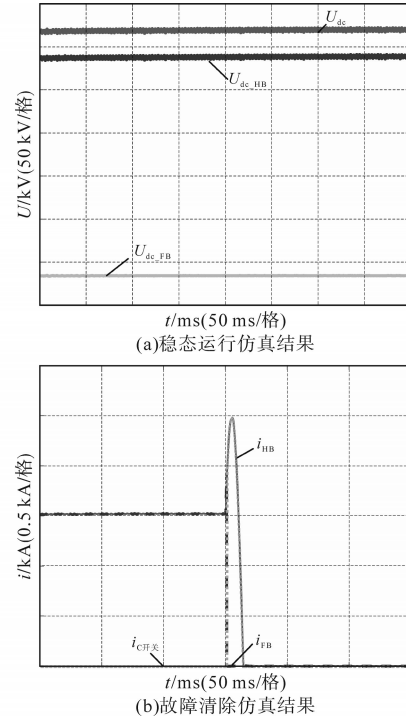


图4 基于RT-LAB的实时仿真

Fig.4 Real-time simulations based on RT-LAB

基于上述结果,所提TSC-hybrid MMC在FB模块占比仅为10%的情况下(远低于常规的50%占比),仍能够完成对直流故障的阻断,大幅度减小了混合型MMC的建设成本与运行功率损耗。

3 经济性综合比较分析

为进一步分析本文所提TSC-hybrid MMC的成本优势,本节对具有直流故障清除能力的常规FB-MMC、混合MMC(50%混合)及TSC-hybrid MMC的成本进行比较分析。

假设上述三种MMC的桥臂子模块均采用了相同的IGBT与电容,且FB-MMC每个桥臂中的子模块个数为 $N_{基准}$,则上述三种具有直流故障隔离功能的MMC成本可以表示为

$$\begin{cases} Co_{全桥} = 6N_{基准}(4Co_{IGBT} + Co_{电容}) \\ Co_{常规混合} = 6N_{基准}(3Co_{IGBT} + Co_{电容}) \\ Co_{TSC-hybrid MMC} = 6N_{基准}[(2k_1 + 4k_2)Co_{IGBT} + Co_{电容}] + Co_{晶闸管} + Co_{开关电容} \end{cases} \quad (15)$$

式中: Co 为成本; Co_{IGBT} 为每个模块中开关成本; $Co_{电容}$ 为每个模块中电容成本; $Co_{晶闸管}$ 为TSC-hybrid MMC中晶闸管开关的成本; $Co_{开关电容}$ 为TSC-hybrid MMC中开关电容的成本。

同时,根据文献[21-22]可知,MMC每个模块中开关与电容的成本关系近似为 $Co_{IGBT}/Co_{电容} =$

0.35/0.3;相同功率与电压等级下,晶闸管与IGBT(含二极管)的成本比近似为5:1,得到图5所示的关于TSC-hybrid MMC成本的分析曲线。相比于FB-MMC,常规混合MMC与本文所提的TSC-hybrid MMC在具有直流故障清除能力的同时均具有更低的成本,且TSC-hybrid MMC具有最小的成本。实际应用中TSC-hybrid MMC的 k_2 值通常在10%~25%,明显地,TSC-hybrid MMC在保证故障清除能力的同时,降低混合MMC的建设成本。

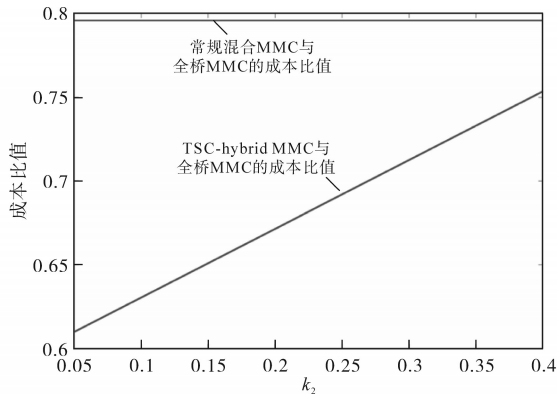


图5 TSC-hybrid MMC成本分析

Fig.5 Cost analysis of TSC-hybrid MMC

4 结论

本文提出了一种集成晶闸管开关电容直流故障换流电路的混合MMC(TSC-hybrid MMC),所提TSC-hybrid MMC通过利用晶闸管开关电容结构,实现了低FB占比的混合MMC技术。相比于常规混合MMC,TSC-hybrid MMC根据应用场景的不同,可将混合MMC中的FB占比降低至10%~25%,甚至更低,且应用的电压等级越高,TSC-hybrid MMC中FB占比的降低值越大。这样,TSC-hybrid MMC可在保证MMC换流站直流故障清除能力的同时降低整体的建设成本与运行损耗。进一步,通过本文的算例可知,所增加的开关电容值通常为几十至几百 μF ,远小于每个子模块的电容值(实际工程通常采用mF级及以上电容),大幅度降低了混合MMC技术中的电容用量及成本。

参考文献

[1] 汤广福,王高勇,贺之渊,等.张北500 kV直流电网关键技术与设备研究[J].高电压技术,2018,44(7):2097-2106.
TANG Guangfu, WANG Gaoyong, HE Zhiyuan, et al. Research on key technologies and equipment of Zhangbei 500 kV DC grid [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2097-2106.

[2] NGUYEN T H, HOSANI K H A, MOURSI M E. Alternating submodule configuration based MMCs with carrier-phase-shift modulation in HVDC systems for DC-fault ride-through capability[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(9): 5214-5224.

[3] 李亚楼,孙谦浩,孟经伟,等.多样性子模块混合型MMC统一外特性高效电磁暂态模型[J].电力系统自动化,2020,44(5):138-145.
LI Yalou, SUN Qianhao, MENG Jingwei, et al. Unified terminal and highly efficient electromagnetic transient model of hybrid modular multilevel converter with various sub-modules[J]. Automation of Electric Power System, 2020, 44(5): 138-145.

[4] 王静,孙谦浩,刘国伟,等.基于电容电压精确计算的MMC环流抑制方法[J].电气传动,2021,51(24):9-15.
WANG Jing, SUN Qianhao, LIU Guowei, et al. Circulating current suppression method for MMC based on capacitor voltage accurate calculation[J]. Electric Drive, 2021, 51(24): 9-15.

[5] 荣飞,龚喜长,黄守道,等.模块化多电平换流器的无差拍控制策略[J].中国电机工程学报,2017,37(6):1753-1763.
RONG Fei, GONG Xichang, HUANG Shoudao, et al. The dead-beat control strategy of modular multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1753-1763.

[6] MATHEW E C, GHAT M B, SHUKLA A. A generalized cross-connected submodule structure for hybrid multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2016, 52(4): 3159-3170.

[7] ALEENEJAD M, MAHMOUDI H, JAFARISHIADEH S, et al. Fault-tolerant space vector modulation for modular multilevel converters with bypassed faulty submodules[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 2463-2473.

[8] LI Rui, XU Lie, YU Lujie, et al. A hybrid modular multilevel converter with reduced full-bridge submodules[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1876-1885.

[9] LI Shuai, ZHANG Jiyuan, XU Jianzhong, et al. A new topology for current limiting HVDC circuit breaker[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 104: 933-942.

[10] 刘剑,何雨微,徐祥海,等.柔性直流电网故障限流技术分析与探讨[J].电力自动化设备,2020,40(4):9-15.
LIU Jian, HE Yuwei, XU Xianghai, et al. Analysis and discussion of fault current limiting technology in flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 9-15.

[11] LIU Gaoren, XU Feng, XU Zheng, et al. Assembly HVDC breaker for HVDC grids with modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 931-941.

[12] 郭贤珊,周杨,梅念,等.张北柔直电网的构建与特性分析[J].电网技术,2018,42(11):3698-3707.
GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Construction and characteristic analysis of Zhangbei flexible DC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3698-3707.

[13] 李斌,贾涵茹,何佳伟,等.混合式直流故障限流器改进拓扑及其参数设计方法[J].电力自动化设备,2023,43(1):140-149.

LI Bin, JIA Hanru, HE Jiawei, et al. Improved topology of hybrid DC fault current limiter and its parameter design method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(1): 140-149.

[14] 贺之渊, 王威儒, 谷怀广, 等. 兼备故障限流及开断功能的直流电网集成化关键设备发展现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3402-3417.

HE Zhiyuan, WANG Weiru, GU Huaiguang, et al. Development status and prospect of integrated key equipment of DC power grid with fault current limiting and breaking functions[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3402-3417.

[15] MERLIN M M C, SANCHEZ D S, JUDGE P D, et al. The extended overlap alternate arm converter: a voltage-source converter with DC fault ride-through capability and a compact design[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 3898-3910.

[16] 宋强, 杨文博, 李笑倩, 等. 集成直流断路器功能的模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 6004-6013.

SONG Qiang, YANG Wenbo, LI Xiaoqian, et al. An MMC topology integrated with DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 6004-6013.

[17] 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.

MA Baohui, CHENG Sheng, SHI Shuhuai, et al. Control strategy of DC transformer based on hybrid submodule MMC structure[J]. Electric Drive, 2019, 49(10): 75-79.

[18] JUN Qin, SAEEDIFARD M, ROCKHILL A, et al. Hybrid design of modular multilevel converters for HVDC systems based on various submodule circuits[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 385-394.

[19] LEE J H, JUNG J J, SUL S K. Balancing of submodule capacitor voltage of hybrid modular multilevel converter (MMC) under DC bus voltage variation of HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(11): 10458-10470.

[20] 张建忠, 陈桂, 张雅倩, 等. 混合型 MMC 非闭锁型直流短路故障穿越策略分析和比较[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 41-47, 63.

ZHANG Jianzhong, CHEN Gui, ZHANG Yaqian, et al. Analysis and comparison of non-blocking DC short circuit fault ride-through strategies for hybrid MMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 41-47, 63.

[21] SONG Qiang, ZENG Rong, YU Zhanqing, et al. A modular multilevel converter integrated with DC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2502-2512.

[22] ZHAO Xiaodong, LI Binbin, ZHANG Bingxu, et al. A high-power step-up DC/DC converter dedicated to DC offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 37(1): 65-69.

收稿日期:2022-04-12

修改稿日期:2022-07-11

~~~~~  
(上接第 47 页)

LIU Wei, MA Haichao, ZHANG Haitao, et al. Development of solid hybrid DC circuit breaker for DC distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 37-42.

[5] 朱童, 余占清, 曾嵘, 等. 全固态直流断路器在低压直流配电系统中的应用[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4): 50-56.

ZHU Tong, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Application of all-solid-state circuit breaker in low-voltage DC distribution system[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 50-56.

[6] 朱金保. 从应用场所需求谈低压直流断路器[J]. 电器与能效管理技术, 2019(22): 23-29.

ZHU Jinbao. Discussion on low voltage DC circuit breakers from application field requirements[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(22): 23-29.

[7] DING C, NIE T, TIAN X, et al. Analysis of the influence of RC buffer on DC solid-state circuit breaker[J]. Energy Reports, 2020, 6: 1483-1489.

[8] WU T, WANG Z, FANG C, et al. Research on current limiting solid state circuit breaker for DC microgrid[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 209(Aug.): 107950.

[9] LIAO X, LI H, YAO R, et al. Voltage overshoot suppression for SiC MOSFET-based DC solid-state circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2019, 9(4): 649-660.

[10] 卫思明, 张一工, 张森. 新型固态直流断路器时序控制策略研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(4): 45-50.

WEI Siming, ZHANG Yigong, ZHANG Sen. Study on time sequence control strategies of new solid state DC circuit breaker[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(4): 45-50.

[11] 胡杰, 王莉, 穆建国. 直流固态断路器现状及应用前景[J]. 电力系统保护与控制, 2009(19): 145-150.

HU Jie, WANG Li, MU Jianguo. Present status of DC solid-state circuit breaker and its potential application[J]. Power System Protection and Control, 2009(19): 145-150.

[12] 丁锐, 石新春. 碳化硅 MOSFET 用于 500 V 低压直流断路器的可行性研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(14): 64-69.

DING Rui, SHI Xinchun. The silicon carbide MOSFET feasibility study for 500 V low voltage DC circuit breaker high voltage appliances[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(14): 64-69.

[13] 丁璨, 聂太平, 田小健, 等. 一种配网级联式固态直流断路器的拓扑设计[J]. 南方电网技术, 2021, 15(5): 29-35.

DING Can, NIE Taiping, TIAN Xiaojian, et al. A topology design of cascade solid-state DC circuit breaker with distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(5): 29-35.

收稿日期:2022-10-10

修改稿日期:2022-11-04