

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210078

基于半桥型 MMC 的柔性直流电网故障限流方法综述

陈磊¹, 何慧雯², 王磊², 李国城¹, 陈红坤¹

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: 现阶段投运的柔性直流电网通常采用半桥型模块化多电平变换器(Modular Multilevel Converter, MMC), 具有惯量低、阻尼小等基本特征, 存在故障演变迅速、设备过流能力弱、故障电流开断难等技术挑战。妥善处理柔性直流电网的故障电流限制问题, 具有重要的理论价值与现实意义。针对于此, 阐明了柔性直流输电技术的发展需求和引入故障限流措施的必要性, 系统地总结了国内外研究现状。依据实体限流和虚体限流技术方案进行了分类整理和性能比较, 论述了两类限流措施的技术优势及不足之处。最后, 提出了半桥型 MMC 柔性直流电网故障限流方法的未来发展方向, 探讨了其中的难点问题和解决思路。

关键词: 柔性直流电网; 故障限流方法; 半桥型 MMC; 虚实融合限流; 混合型直流限流器

Review of the fault current limiting approaches for a flexible DC grid based on a half-bridge MMC

CHEN Lei¹, HE Huiwen², WANG Lei², LI Guocheng¹, CHEN Hongkun¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Currently, the flexible Direct Current (DC) grid usually adopts the half-bridge Modular Multilevel Converter (MMC), and it has basic characteristics such as low inertia and small damping. The technical challenges including rapid fault development, weak overcurrent tolerance and insufficient current breaking ability should be carefully addressed. It is of significance to properly handle the fault current limiting issues of the flexible DC grid. In this paper, the development requirements of flexible DC transmission technology and the necessity of introducing fault current limiting approaches are stated. Domestic and foreign research results are systematically summarized. According to the classification of the actual and virtual fault current limiting schemes, their technical advantages and disadvantages are compared and analysed. Finally, the probable development direction of the fault current limiting approaches for the flexible DC grid based on half-bridge MMC are suggested, and potential problems as well as solutions are discussed.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China "Study on Overvoltage and Insulation Coordination of Hybrid HVDC System with LCC-VSC" (No. SGTYHT/16-JS-198).

Key words: flexible DC grid; fault current limiting approaches; half-bridge MMC; virtual-actual integration current limiting; hybrid type DC fault current limiter

0 引言

我国能源资源和电力负荷中心分布极不均衡, 80%以上的能源资源分布在西部及北部, 70%以上的电力消费集中在东部与中部。大规模能源的开发和优化配置需求决定了我国电网必须发展远距离、大容量的电力输送通道。当前, 国内建成了多个基

于晶闸管的常规直流输电工程和特高压交流工程。但常规直流输电技术存在换相失败风险, 无功功率消耗严重, 并且受电侧需要一定强度的交流系统支持。特高压交流输电技术存在较突出的稳定性和可靠性问题, 某种程度上制约了其推广应用。

在全球能源互联网背景下, 柔性直流输电以全控型电力电子开关和脉宽调制技术为基础, 相比于常规直流输电具备以下优势^[1-4]:

- 1) 正常运行时的有功/无功功率解耦控制;
- 2) 不依赖于受端交流电网, 具备向弱电网甚至

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助“LCC-VSC混合直流输电系统过电压与绝缘配合研究”(SGTYHT/16-JS-198)

无源电网供电的能力;

3) 消除了换相失败风险, 提高了供电可靠性;

4) 模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)谐波水平低, 无需特定滤波器;

5) 各换流站能够独立运行和控制, 对站间快速通信的要求较低。

基于 MMC 的柔性直流输电技术可很好地应用在新能源并网、城市孤岛供电、电网非同步互联等不同场景^[5-6]。表 1 为我国现阶段投运的柔性直流电网工程。

表 1 我国现阶段投运的柔性直流电网工程

Table 1 Projects of the flexible DC grid in China

| 序号 | 工程名称 | 额定容量 | 电压等级 | 投运时间 | MMC 类型 |
|----|----------------|----------|---------|--------|--------|
| 1 | 上海南汇柔性直流输电示范工程 | 18 MW | ±30 kV | 2011 年 | 半桥 |
| 2 | 南澳多端柔性直流输电示范工程 | 200 MW | ±160 kV | 2013 年 | 半桥 |
| 3 | 舟山多端柔性直流示范工程 | 400 MW | ±200 kV | 2014 年 | 半桥 |
| 4 | 舟山多端柔性直流示范工程 | 400 MW | ±200 kV | 2015 年 | 半桥 |
| 5 | 鲁西背靠背直流 | 1 000 MW | ±350 kV | 2016 年 | 半桥 |
| 6 | 渝鄂背靠背直流 | 2 500 MW | ±420 kV | 2016 年 | 半桥 |
| 7 | 张北柔性直流电网试验示范工程 | 3 000 MW | ±500 kV | 2019 年 | 半桥 |

目前柔性直流电网通常采用半桥型 MMC, 具有惯量低、阻尼小等基本特征。柔性直流电网一旦发生直流侧短路故障, 电容元件的快速放电会使得功率变换器件流过幅值大、陡度高的短路电流, 并在故障后数毫秒内超出开关器件的耐受上限。这将严重危害柔性直流电网及其相连电气设备的安全稳定运行, 同时可能造成巨大经济损失。

本文阐明了柔性直流电网中应用故障限流措施的必要性, 系统地总结了国内外直流故障限流技术的研究现状, 依据实体限流和虚体限流方案进行了分类整理和综合性能比较, 论述了两类限流技术方案的优缺点。最后, 讨论了虚实融合限流技术、混合型直流限流器及限流型直流断路器在柔性直流电网中的应用潜力, 展望了直流故障限流方法的未来发展方向, 指出了相关难点问题与研究思路。

1 MMC 直流故障特性分析及限流必要性

MMC 的直流故障过程可分为直流电容放电、续流二极管自然换向导通和二极管同时导通三个阶段^[7]。故障初期直流故障电流以直流电容放电电流为主, 其等效电路如图 1 所示。

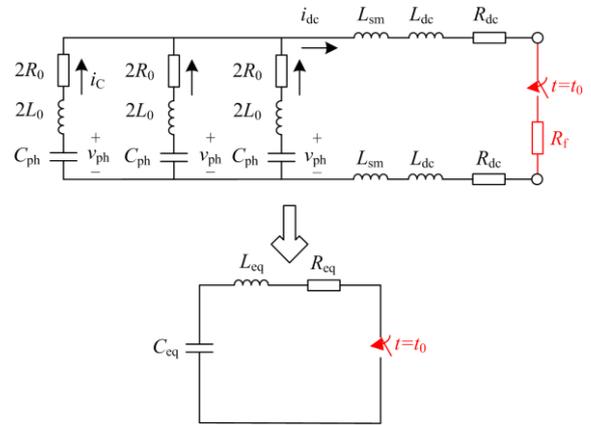


图 1 MMC 故障等效电路图

Fig. 1 Equivalent fault analysis circuit of MMC

图中, L_0 和 R_0 分别代表桥臂电感和电阻, L_{dc} 和 R_{dc} 分别代表直流输电线路从换流器到故障点的电感和电阻, L_{sm} 代表平波电抗器, R_f 为故障电阻, C_{ph} 为每一相上、下桥臂电容之和, v_{ph} 为 C_{ph} 两端电压。

假设: (1) 三相网侧电压和网侧电流为纯正弦波且三相对称; (2) 在发生直流故障前, MMC 已处于正常工况, 此时直流电流、直流电压分别为 I_{dc} 、 V_{dc} ; (3) 每个桥臂电感、桥臂电阻相等, 分别为 L_0 和 R_0 , 网侧电流在上、下桥臂中平均分配; (4) 主电路开关器件均为理想元件, 无压降、无损耗。

由基尔霍夫第二定律可得:

$$v_{ph} = \left(\frac{2L_0}{3} + 2L_{sm} + 2L_{dc} \right) \frac{di_{dc}}{dt} + \left(\frac{2R_0}{3} + 2R_{dc} + R_f \right) i_{dc} \quad (1)$$

$$i_{dc} = -3C_{ph} \frac{dv_{ph}}{dt} \quad (2)$$

令 $L_{eq} = 2L_0/3 + 2L_{sm} + 2L_{dc}$, $R_{eq} = 2R_0/3 + 2R_{dc} + R_f$, $C_{eq} = 3C_0/N$, 式(1)、式(2)可重写为

$$\begin{cases} \frac{di_{dc}}{dt} = \frac{v_{ph}}{L_{eq}} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_{dc} \\ \frac{dv_{ph}}{dt} = -\frac{1}{C_{eq}} i_{dc} \end{cases} \quad (3)$$

假设 MMC 在 $t = t_0$ 时刻发生故障, 解得

$$i_{dc} = I_{dc} e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_0}} \left[\cos \omega(t-t_0) - \frac{1}{\omega \tau_0} \sin \omega(t-t_0) \right] + \frac{V_{dc}}{\omega L_{eq}} e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_0}} \sin \omega(t-t_0) \quad (4)$$

$$\text{式中: } \tau_0 = 2L_{eq}/R_{eq}; \quad \omega = \sqrt{\frac{4L_{eq}}{C_{eq}} - R_{eq}^2} / 2L_{eq}.$$

鉴于式(4)较为复杂, 可做进一步简化处理。考虑到故障初期子模块电容电压一般在其额定值附近小范围波动, 可将每一相上所有子模块电容电压之和 v_{ph} 视为一个恒定电压源, 解得

$$i_{dc} = \left(I_{dc} - \frac{v_{ph}}{R_{eq}} \right) e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}} + \frac{v_{ph}}{R_{eq}} \approx \left(I_{dc} - \frac{V_{dc}}{R_{eq}} \right) e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}} + \frac{V_{dc}}{R_{eq}} \quad (5)$$

式中: $\tau_1 = L_{eq}/R_{eq}$ 。

通过在某±320 kV 柔性直流电网进行故障仿真分析, 验证了本文所述故障电流理论模型的准确性, 具体比较结果如图 2 所示。仿真结果表明: 在线路发生短路故障后, 半桥型 MMC 柔性直流电网的故障电流将在短时间内上升至数十倍额定电流, 无疑对直流故障隔离带来了严峻挑战^[8-9]。

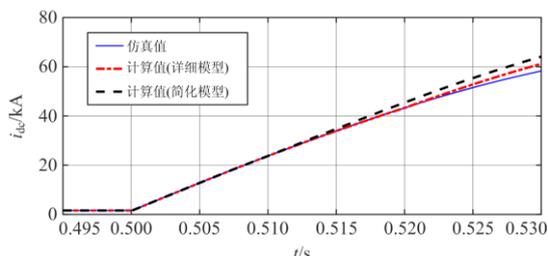


图 2 MMC 直流故障电流仿真分析结果

Fig. 2 Simulation analysis results of DC fault current at MMC

从直接抑制故障电流的角度出发, 研究成本受控、动作迅速、限流性能强的故障限流措施显得尤为重要。这可以保证在直流断路器动作之前, 将短路电流约束在现有直流断路器的开断能力之内, 并在一定程度上降低 MMC 桥臂电流的上升率, 减小功率开关器件的电流应力和电压应力。

2 柔性直流电网实体限流技术研究现状

柔性直流电网实体限流技术的核心理念是利用物理设备抑制短路电流, 主要实施方法是故障后快速将限流电阻、电感串联接入直流电流的流电路径, 减小故障电流的上升率及峰值水平。如在半桥型 MMC 桥臂中添加阻尼模块, 在直流线路中装设不同类型的直流限流器等。需要补充的是, 通过改造 MMC 子模块拓扑, 使子模块电容实现负电平输出, 从而抑制故障电流, 原则上亦可纳入实体限流范畴。考虑到实体限流在工作原理、影响机制及安装位置上的差异, 大致归类为: 改进 MMC 子模块拓扑、增设 MMC 限流模块、加装直流限流器等三种技术

方案, 以下进行详细论述。

2.1 改进 MMC 子模块拓扑

针对半桥型 MMC 子模块故障后迅速放电的特性, 国内外专家学者提出了多种 MMC 子模块改进拓扑, 通过引入附加电力电子开关, 改变电流通路路径以实现故障限流。

文献[10]提出了在 MMC 子模块两端并联两个晶闸管, 故障后迅速触发晶闸管将子模块电容旁路, 达到减小放电能量和降低故障电流的目的, 如图 3 所示。需注意的是, 故障后各相桥臂间会出现环流, 并且直流偏置作用明显, 存在晶闸管关断失败风险。从提高 MMC 子模块内部结构的角度出发, 相继提出了全桥子模块(Full Bridge Sub-Module, FBSM)、二极管钳位子模块(Diode-Clamp Sub-Module, DCSM)、增强自阻型子模块(Self-Blocking Sub-Module, SBSM)等新型拓扑改进方案^[11-13], 其示意结构如图 4 所示。

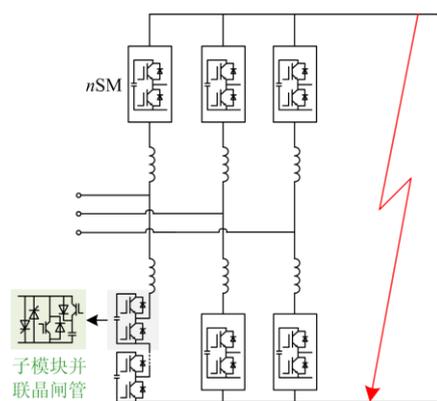


图 3 含并联晶闸管的 MMC 子模块示意图

Fig. 3 Schematic diagram of MMC sub-module including parallel thyristor

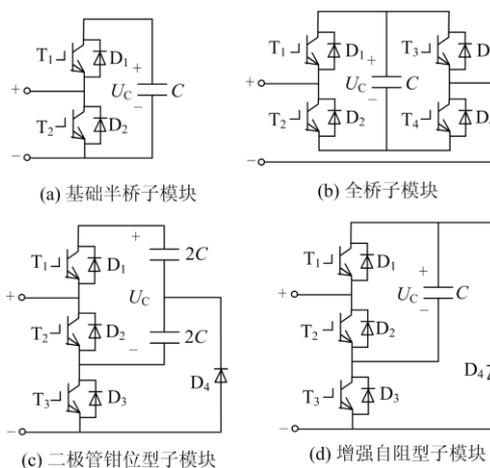


图 4 不同拓扑结构的 MMC 子模块

Fig. 4 Different topology schemes of MMC sub-modules

另外,文献[14-16]综合考虑了半桥型 MMC 的成本优势和全桥型 MMC 的故障自清除能力,针对混合型 MMC 的直流故障无闭锁限流-穿越问题开展了较系统的研究。

2.2 增设 MMC 限流模块

该技术方案的思路是:在保证子模块半桥型拓扑结构不变的前提下,改变 MMC 内部各子模块间接接方式,增设限流模块以达到故障电流抑制效果。

文献[17-18]验证了增设桥臂阻尼模块在半桥型 MMC 柔性直流电网故障限流中的可行性,研究表明:桥臂阻尼模块可处理双极短路和桥臂短路两类故障,在故障期间阻尼电阻的快速投入加剧了直流故障电流的衰减,减小了换流阀的电流应力。文献[19]研究了一种基于桥臂耦合电感的自然限流型 MMC,其利用耦合电感对直流电流波动和异常突变进行抑制,并指出了桥臂电感耦合程度对直流故障电流的影响。在此方案中,耦合电感会一定程度上影响平波电抗器的取值,需对耦合电感的参数设计与优化配置开展深入研究。文献[20]提出了一种增设准反向阻断和限流模块的半桥型 MMC 拓扑结构,比较分析了反向阻断模块(即桥臂阻尼模块)安装位置的差异对 MMC 故障处理性能的影响,证明了双模块的有效配合有助于加快故障电流的衰减速率,对提升柔性直流电网故障恢复能力大有裨益。图 5 为桥臂阻尼模块、准反向阻断模块及桥臂耦合电感在半桥型 MMC 中的应用示意图。

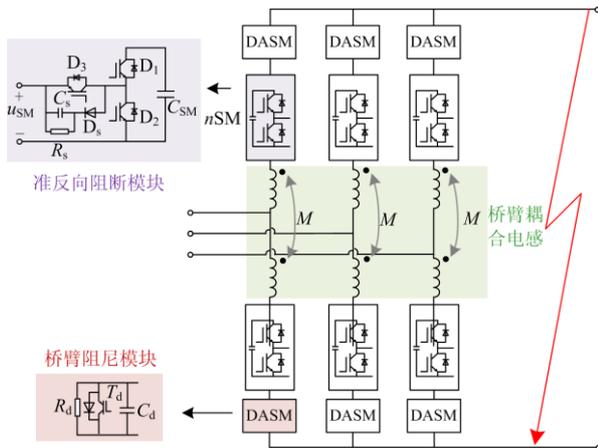


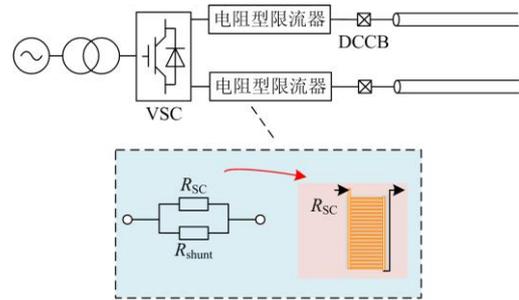
图 5 桥臂阻尼模块、准反向阻断模块及桥臂耦合电感在半桥型 MMC 中的应用示意图

Fig. 5 Schematic diagram of half-bridge MMC with bridge arm damper sub-modules, quasi reverse blocking sub-modules and arm coupling inductor

2.3 加装直流限流器

根据直流限流器的阻抗呈现形式,可分为电阻

型、电感型和混合型。电阻型限流器在柔性直流电网中的应用受到了国内外学术界和工业界的重点关注,围绕电阻型限流器的结构模型、参数设计、电-磁-力-热耦合机制及其与直流断路器的配合策略,取得了较丰硕的研究成果[21-28]。本课题组针对电阻型超导限流器在不同电压等级直流电网的应用可行性也开展了初步研究,理清了限流参数与故障电流峰值、衰减速度和系统阻尼之间的影响关系,为指导限流器设计并提高其在柔性直流电网的技术经济性提供了一定理论支撑[29-32]。当前,国内已成功研制了用于柔性直流电网的 40 kV/2 kA 电阻型超导限流器样机,试验结果验证了限流器样机的有效性,整体失超恢复时间少于 200 ms[33]。图 6 给出了电阻型限流器在柔性直流电网的接入方式及 40 kV/2 kA 样机实物图。除了基于超导带材的电阻型限流器以外,文献[34]提出了一种基于液体金属的新型电阻型直流限流器,分析了该限流器应用于中压直流配电网的故障限流和耗能特性,并研制了试验样机以证明限流原理的正确性。



(a) 限流器的接入方式



(b) 40 kV/2 kA 限流器样机

图 6 电阻型限流器在柔性直流电网中的应用

Fig. 6 Application of resistive superconducting fault current limiters (SFCLs) in flexible DC grid

专家学者提出的电感型直流限流器结构不一而足,依据工作原理,主要可分为磁通耦合式、固态式和饱和铁芯式。文献[35]提出了一种磁通耦合式电感型限流器,其拓扑结构如图 7(a)所示,其由电力电子开关、耦合电抗器和机械旁路开关组成,在短路故障发生后,电力电子开关动作将耦合电感接

入故障回路实现电流抑制。文献[36]借鉴文献[35]基于磁通耦合的设计思路, 使用 GTO 和二极管阀组替换 IGBT 阀组, 提出了如图 7(b)所示的改进磁通耦合式限流器结构, 其在降低设备成本的同时, 实现了限流器的自动投切。

文献[37]提出了一种基于晶闸管和换相电容的固态式电感型直流限流器, 如图 7(c)所示, 其使用半控型负载转换开关以节省成本, 利用电容充放电实现特定桥臂的触发操作, 能够在故障后迅速地将限流电感串入放电回路。文献[38]借鉴了混合式直流断路器的换流设计理念, 采用三组反向并联晶闸管阀组和一对预充电电容, 提出了一种具备低损耗性能的固态式电感型直流限流器, 如图 7(d)所示。文献[39-40]提出了基于永磁偏置和直流偏置的饱和铁芯式电感型限流器, 如图 7(e)所示, 通过仿真分析及小样机试验, 初步验证了该型限流器在柔性直流电网中的适用性。随着故障电流上升, 铁芯磁导率增大, 限流电感随之投入故障回路。该型限流器属于自触发动作限流, 无需配置额外的故障检测系统。然而, 大容量等级直流偏置线圈的过电压和绝

缘问题尚待进一步解决, 永磁偏置的材料选择和退磁风险亦需深层次论证。总体而言, 电感型限流器的拓扑结构较电阻型限流器要更为复杂, 并会涉及到主动开关控制和故障电流转移过程, 其在触发机制和限流性能上通常要弱于电阻型限流器。

为进一步发挥电阻型和电感型限流器的性能优势, 专家学者提出了混合型限流器^[41]。文献[42-45]提出了一种改进磁通耦合式混合型限流器, 其实现了电阻型和电感型限流组件的有效集成, 利用复合限流阻抗抑制短路电流, 不仅保留了基础磁通耦合式拓扑原有的技术优点, 而且耦合变压器的引入显著提高了电阻限流单元通流设计的灵活性。为探明混合型限流器在柔性直流电网中的适应性, 本课题组联合华中科技大学开展了相关研究, 文献[46-47]表明: 混合型限流器具有无延迟触发机制, 在直流电网中展现了良好的故障限流和快速恢复性能。

3 柔性直流电网虚体限流技术研究现状

柔性直流电网虚体限流技术的核心理念是挖掘直流电网控制器的限流潜能, 旨在不增设实体限流装备的前提下改进换流器控制策略, 以期减小 MMC 子模块电容的投入数量, 实现抑制直流放电电流和降低 MMC 桥臂电流的目的。通过对现有文献的收集梳理, 并根据改进控制的实施对象, 大致归类为: 改进外环电压控制和改善桥臂电压控制两种技术方案。

3.1 改进外环电压控制

该方法的技术思路是对 MMC 外环控制器进行改进, 根据直流电流、直流电压等测量电量变化特性, 调整外环电压参考指令值以实现虚体限流目的。

文献[48]研究了限流阻抗在 MMC 换流站控制器中的映射效应, 如图 8(a)所示。通过在外环定直流电压控制回路中加入与直流电流、限流阻抗相关的附加分量, 设计了一种基于虚拟阻抗的 MMC 直流侧限流方法。但若虚拟限流阻抗取值过大, 会对直流系统的稳态运行造成负面影响。在此约束之下, 虚拟限流阻抗的限流效果相对不足。文献[49]将文献[48]的虚拟阻抗限流方法推广至 MMC 型直流变压器, 仿真分析结果肯定了该方法的适用性。文献[50]提出了一种紧急限流控制策略, 即故障后直流电压指令值与该 MMC 相连的直流线路最低电压保持一致, 如图 8(b)所示, 由此实现了直流电压指令值的自适应变化及限流目的。但该方法高度依赖快速可靠的站间通信, 工程实用性有待进一步论证。图 8 为改进外环电压控制示意图。

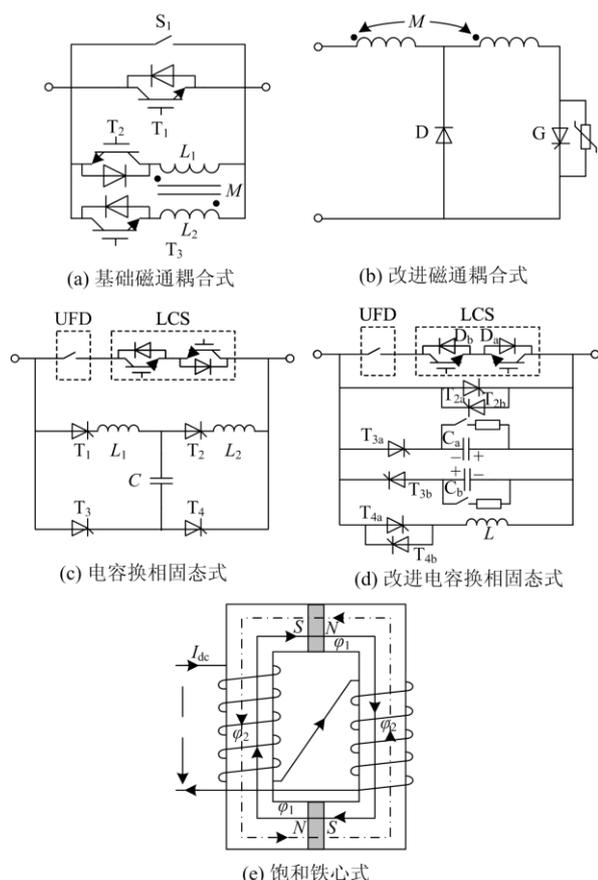


图 7 电感型直流限流器拓扑结构图

Fig. 7 Topology of inductive DC fault current limiters

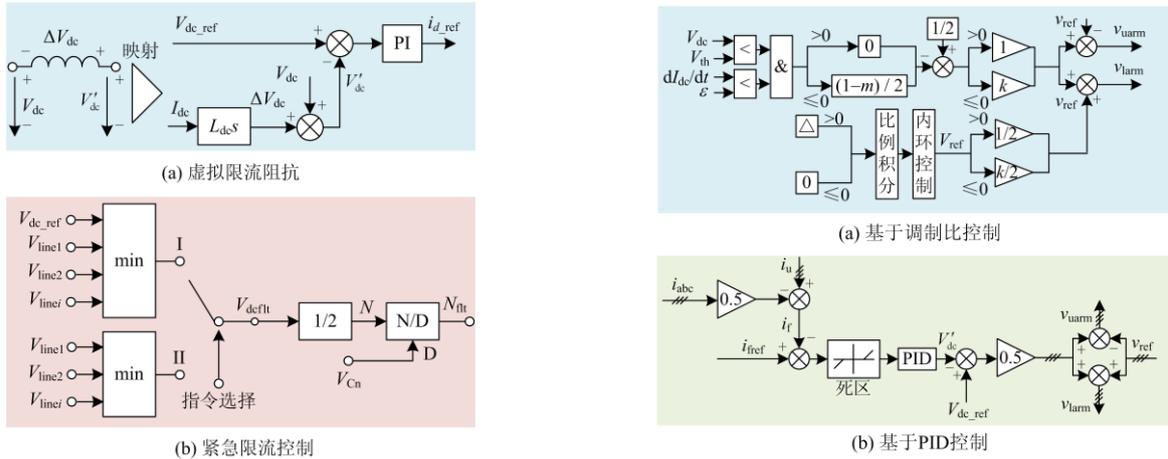


图 8 改进外环电压控制示意图

Fig. 8 Schematic diagram of improved outer loop voltage control

3.2 改善桥臂电压控制

该方法的技术思路是根据调制比、直流电流等典型故障特征量，对调制模块中桥臂电压的参考值进行修正，从而达到虚体限流效果。

文献[51]设计了一种降低桥臂电压直流分量的限流方法，利用系统调制比在故障后降低的特点，将桥臂电压参考值乘以调制比得到新的参考值，如图 9(a)所示。该方案削减了投入故障回路的子模块电容数目，实现了电流抑制功能。文献[52]提出了一种适用于辐射柔性多端直流电网的主动限流控制方法，根据 PID 控制器计算与直流电流相关的桥臂电压参考值附加分量，如图 9(b)所示。该附加分量减小了故障后桥臂电压参考值的直流分量，由此达到限流目的。上述虚体限流方法均能避免对 MMC 交流侧电压造成消极影响，但限流效果相对薄弱，并且 PID 参数整定较为复杂。

文献[53-54]分析了降低桥臂电压交直流分量对抑制短路电流所带来的积极作用，并分别引入了虚拟电阻和虚拟电感，根据直流电流瞬时值及其变化率确定了桥臂电压交直流增益 K_M ，实现了自适应限流，如图 9(c)—图 9(d)所示。结合仿真分析结果，验证了所提虚体限流方法处理不同深度直流故障的有效性。文献[55]在文献[54]所研虚拟电感限流的基础上，进一步引入直流电流偏差控制以调整增益 K_M ，提出了一种自适应故障限流控制策略，如图 9(d)所示。文献[56]采取直流电压下降速率作为附加直流偏置量，以此降低桥臂电压直流分量，亦为深入挖掘换流器自身的限流潜力提供了一条可行的技术途径。需要指出的是，改善桥臂电压控制此虚体限流方法会降低 MMC 出口侧的交流电压，导致交流电网向 MMC 馈入功率增加，功率开关器件存在

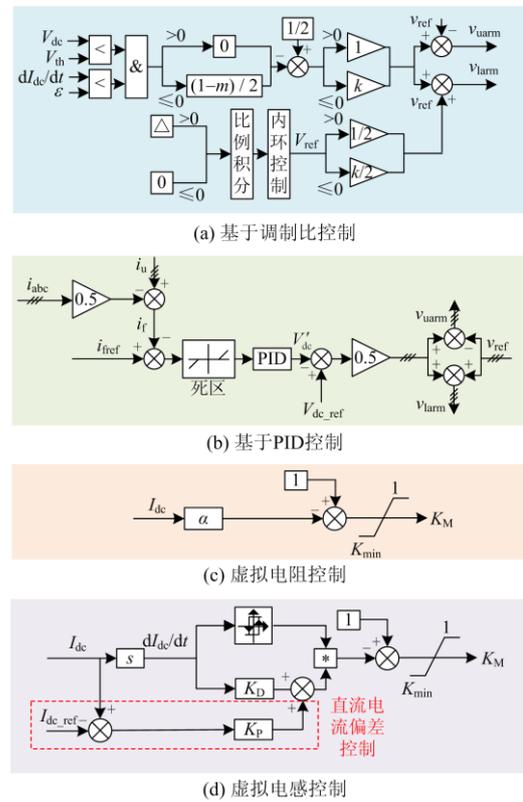


图 9 改善桥臂电压控制示意图

Fig. 9 Schematic diagram of enhanced bridge arm voltage control

一定过载风险。

4 现有直流限流技术的性能评价与比较

目前，国内外专家学者针对半桥型 MMC 柔性直流电网故障限流技术已经开展了一系列研究工作，并且围绕实体、虚体限流技术取得了多项具有重要意义研究成果。事实上，故障限流技术在柔性直流电网的应用性能评价需计及多方面因素。参考文献[57]所提出的直流限流技术需求，本文以快速性、选择性、经济性、限流性能和可拓展度为评价原则，对实体限流和虚体限流中的五种典型技术方案进行了比较分析。

评价原则的定义如下所述。

(1) 快速性：柔性直流电网发生短路故障后，触发限流措施的响应速度。对于加装直流限流器此类技术方案而言，反映的是限流阻抗串入故障回路的时间，其时间越短，快速性越好。

(2) 选择性：柔性直流电网发生短路故障后，能够选择仅与故障线路直接耦合的限流措施投入运行，避免对非故障线路造成不利影响。例如，当柔性直流电网中装设多台限流器时，应保证非故障线路的限流器不被误触发。

(3) 经济性: 限流措施成本, 如投资维护费用。

(4) 限流性能: 限流措施对直流故障电流上升率和峰值水平的限制能力。

(5) 可拓展度: 限流措施在半桥型 MMC 柔性直流电网中的实施难易度和未来推广度。在直流电网换流站扩容和直流网络进一步拓展后, 限流措施不应应对新增控制保护设备造成不利影响。

表 2 给出了五种典型直流故障限流技术方案的性能比较。高温超导材料的失超机制使得电阻型限流器对故障具备毫秒级响应速度, 属于自触发限流, 其与使用外部触发的电感型限流器、阻尼模块和改进桥臂电压控制相比, 具有更好的快速性。在选择性方面, 改进 MMC 拓扑和改进桥臂电压控制通常会影响到故障线路耦合的非故障线路传输功率, 而直流限流器仅作用于故障线路。此外, 规模化替换 MMC 与增设桥臂阻尼的成本相当可观, 在某种意义上制约了其拓展性。尽管改进桥臂电压控制的硬件成本投入很低, 但需谨慎考虑交流馈入功率及功率开关器件过载能力对限流性能的影响。总体而言, 电阻型限流器的性能更加均衡, 其故障限流能力及在直流电网扩容增资中的适应性相对较好。为进一步在柔性直流电网中推广应用电阻型限流器, 节省设备投资和提升技术经济性是其中的关键所在。

表 2 典型直流故障限流技术方案的性能比较

Table 2 Performance comparison of typical DC fault current limiting measures

| 技术方案 | 快速性 | 选择性 | 经济性 | 限流能力 | 可拓展度 |
|-----------|-----|-----|-----|------|------|
| 全桥/混合 MMC | 较快 | 较差 | 较差 | 强 | 一般 |
| 桥臂阻尼模块 | 较快 | 较差 | 一般 | 较弱 | 一般 |
| 电阻型限流器 | 快 | 好 | 一般 | 较强 | 较高 |
| 电感型限流器 | 较快 | 好 | 一般 | 较强 | 较高 |
| 改进桥臂电压控制 | 较快 | 一般 | 好 | 适中 | 高 |

5 柔性直流电网故障限流技术的未来展望

5.1 虚实融合限流技术

如前所述, 实体限流技术具有良好的短路电流抑制效果, 然而其安装容量的增加势必带来设备成本的上升, 在一定程度上影响其在直流电网规模化应用的可行性。虚体限流技术成本低, 控制灵活, 但是会降低换流器出口侧的交流电压, 并带来桥臂过流、功率冲击等问题。受制于换流阀内功率开关器件的耐流水平, 虚体限流效果相对有限。

为充分挖掘柔性直流电网虚体限流的潜能, 减小实体限流装备的容量和成本, 发展虚实融合限流技术是一条潜在的解决方案。对于不同严重程度的直流短路故障而言, 轻度故障下仅需触发虚体限流, 中度、重度短路故障使用虚体融合实体限流进行故障抑制。图 10 为虚实融合限流示意图。在此, 虚体限流采用虚拟电感限流控制, 实体限流选用电阻型限流器, 技术思路做如下简述。

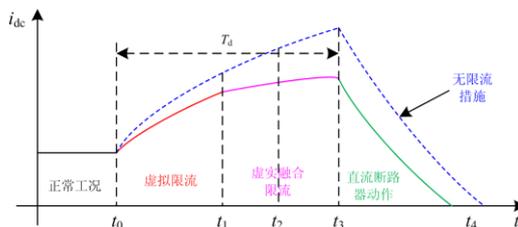


图 10 虚实融合限流示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the virtual-actual integration current limiting method

图 10 中, 在 $t=t_0$ 时刻发生线路故障, 虚体限流控制模块经短延时后投入, 直流电流上升趋势受到一定抑制。在 $t=t_1$ 时刻, 直流电流水平超过电阻型限流器的临界电流, 超导线圈失超投入限流电阻, 虚实融合限流工作状态启动。在 $t=t_2$ 时刻, 线路保护向直流断路器发出跳闸信号, 至 $t=t_3$ 时刻直流断路器的超快速开关拉开至额定开距, 此刻到达直流电流峰值。随后, 直流电流转移至避雷器, 电流过零, 完成故障隔离。

通过在图 11 所示的两端柔性直流输电系统中应用虚实融合限流技术, 得到的故障电流仿真波形如图 12 所示。直流线路发生金属性双极短路故障后, 在 MMC1 侧装设 $R_{FCL1}=27\ \Omega$ 的实体限流器, 可将电流限制在 9.97 kA, 限流率为 42.47%。虚实融合限流只需安装 $R_{FCL1}=18.1\ \Omega$ 的实体限流器即可达到相同限流效果, 有效降低了限流器的安装容量。

在 MMC2 侧, 为将直流短路电流限制在 10 kA 以内(限流率为 37.18%), 单独使用实体限流器的参数取值为 $R_{FCL2}=22.3\ \Omega$ 。相比而言, 使用虚实融合限流仅需配置 $R_{FCL2}=8.5\ \Omega$ 的实体限流器。研究结

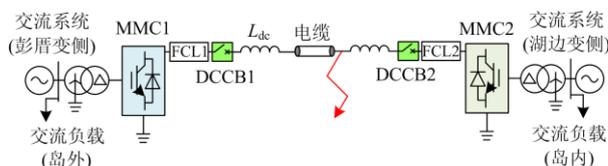


图 11 应用虚实融合限流的两端柔性直流输电系统

Fig. 11 Two-terminal flexible DC transmission system with the virtual-actual integration current limiting method

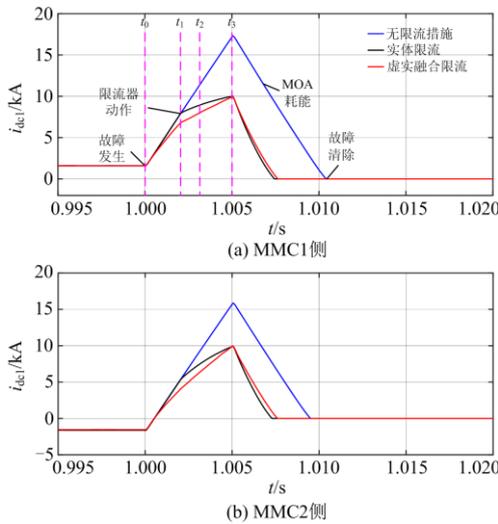


图 12 采用虚实融合限流的直流故障电流仿真波形

Fig. 12 DC fault current characteristics of HVDC system based on the virtual-actual integration current limiting method

果表明:虚实融合限流技术在保证限流效果的同时,充分发挥了换流器自身的限流潜能,明显降低了实体限流器安装容量,对降低设备成本具有重要意义。

针对虚实融合限流技术,有必要研究虚体限流控制与实体限流器在柔性直流电网的自适应融合机制,深入探讨差异化故障深度下虚体限流与实体限流器的启动时序、参数匹配和协作区间。除此之外,虚体限流的具体实现形式和实体限流器的结构方案选型尚有待进一步论证,两者之间的契合性和适配性是有待突破的关键问题。

5.2 混合型直流限流器

考虑到未来多端直流互联大系统的演变和发展,直流短路问题或将变得更加严峻,亟需研究一种限流能力更强的故障应对措施,混合型直流限流器有望在此方面获得突破。图 13 给出了一种混合型直流限流器的拓扑电路及原理示意图。

图 13 中: L_1 和 L_2 分别为超导绕组和常导绕组,二者通过铁芯形成高耦合线圈; S_1 和 S_2 为电流转移开关; R_{PL} 为并联限流电阻; R_{AL} 为附加限流电阻。在系统正常运行时, S_1 和 S_2 处于闭合状态,由于 L_1 被短接,高耦合线圈仅呈现很小的漏感,限流器对系统运行基本无影响。在发生短路故障后,触发 S_1 断开以改变磁通路径, S_2 保持闭合状态,限流器将工作在限流模式 I,将电阻-电感阻抗串入故障回路。若后续断开 S_2 ,限流器将进入限流模式 II,限流能力进一步增强。其中,超导绕组额定工作温度拟设定在 65 K,以期在过冷液氮温区内通过降低运行温度获取更大的通流能力,节约带材用量。

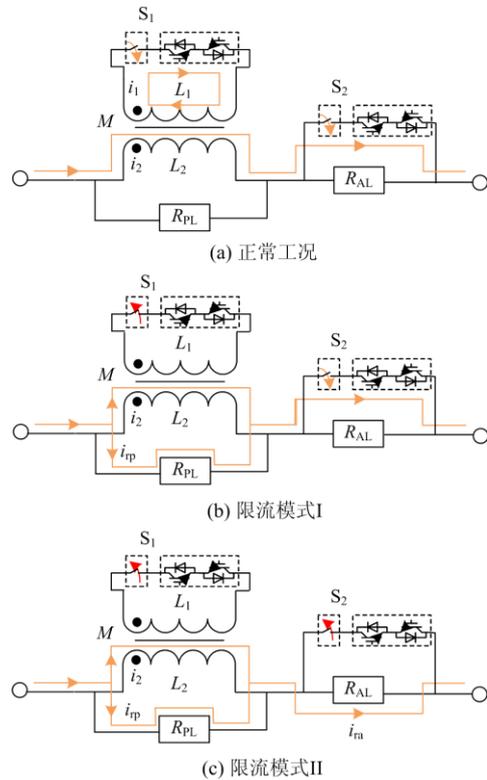


图 13 一种混合型直流限流器的拓扑电路及原理示意图
Fig. 13 Topological structure and working principle of a hybrid type DC fault current limiter

混合型直流限流器具有以下特点:

- (1) 基于电流转移开关改变磁路投入限流阻抗,动作迅速且受控性高;
- (2) 呈现电阻-电感混合型阻抗且配置两级限流模式,限流能力强;
- (3) 利用超导体的零电阻和高通流密度特性,属于非失超型限流器;
- (4) 结构相对简单,通过优化高耦合线圈变比有望进一步节省超导材料,展现良好的技术经济性。

为推动混合型直流限流器在柔性直流电网中的应用,电-磁-力-热多场耦合作用机理还有待深入研究,线圈环流的抑制方式与混合型直流限流器的电磁设计优化方法也是未来需要攻克的难点问题。

5.3 限流型直流断路器

基于直流断路器的故障保护对于多端柔性直流电网有着很强的适用性,其可以提高直流电网故障穿越能力,保证非故障线路可靠供电^[58]。于此,将限流功能集成至直流断路器亦是一条可行路径。图 14 为一种具备限流功能的混合式直流断路器^[59]。

图 14 中混合式直流断路器包括以下四部分:通流支路、限流支路、断路支路和旁路支路。在检

测到故障后, 导通断路器的限流支路, 将限流阻抗投入到故障回路, 继而执行断路操作, 并在旁路过程中加入泄能电阻以加快故障侧的能量耗散。

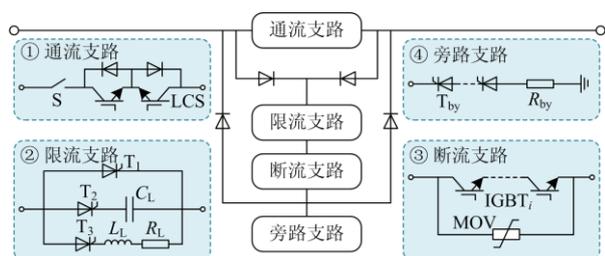


图 14 一种具备限流功能的混合式直流断路器拓扑

Fig. 14 Topological structure of a hybrid type DC circuit breaker with current-limiting function

事实上, 具备限流功能的混合式直流断路器本身是一个成套的设备, 为契合未来直流电网的发展, 应满足成本可控和紧凑化需求^[60]。在此需求下, 限流阻抗的取值将受到电阻/电抗器体积和散热条件的约束, 一定程度上束缚了该型断路器的限流能力。在后续工作中, 亟需开展混合式直流断路器所含限流支路的优化设计, 探明混合式直流断路器组部件承受的多场应力、损耗特性和电磁干扰水平。此外, 关于混合式直流断路器可靠性和运行寿命的评估方法及其与直流控制保护的协调配合仍待深入研究。

6 结论

本文首先论述了柔性直流输电技术的发展背景和柔性直流电网的建设情况, 分析了 MMC 直流故障过程, 给出了故障电流的理论计算模型和仿真结果, 明确了引入限流措施的迫切性和必要性。继而, 围绕实体限流和虚体限流等两类技术方案综述了国内外研究现状, 给出了直流限流技术性能评价原则。最后, 初探了柔性直流电网故障限流技术的未来发展方向, 凝练了需进一步解决的难点。

1) 利用短路电流的简化模型和精确模型, 仿真模拟了直流故障发展过程, 证明短路电流将在短时间内上升至数十倍额定电流, 亟需有效可行的故障限流措施以保证柔性直流电网的安全稳定运行。

2) 给出了柔性直流电网实体限流的基本定义, 分析了改进 MMC 子模块拓扑、增设 MMC 限流模块、加装直流限流器等技术方案的工作原理和应用现状, 指出了混合型限流器的潜在优势。

3) 阐明了柔性直流电网虚体限流核心理念, 分析了改进外环电压控制和改善桥臂电压控制在故障电流抑制方面的积极作用, 指出了其在限流效果、控制参数等方面的性能约束。

4) 制定了涵盖快速性、选择性、经济性、限流性能和可拓展度的直流限流技术评价原则, 选取了五种具有代表性的实体限流和虚体限流措施进行了比较, 指出了电阻型限流器的整体性能最为均衡。

5) 以虚实融合限流、混合型直流限流器和限流型直流断路器为重点研究对象, 展望了柔性直流电网故障限流技术的潜在发展方向, 初步验证了虚实融合限流的有效性和先进性, 指出了有待研究的关键科学问题和限制其发展的因素, 为直流故障限流技术的下一步发展提供了参考思路。

参考文献

- [1] 杜晓磊, 郭庆雷, 吴延坤, 等. 张北柔性直流电网示范工程控制系统架构及协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 164-173.
DU Xiaolei, GUO Qinglei, WU Yankun, et al. Research on control system structure and coordination control strategy for Zhangbei demonstration project of MMC-HVDC grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 164-173.
- [2] ORIOL G B, JOAN S B, EDUARDO P A, et al. Flexible converters for meshed HVDC grids: from flexible AC transmission systems (FACTS) to flexible DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 2-15.
- [3] HE Jinghan, CHEN Ke'ao, LI Meng, et al. Review of protection and fault handling for a flexible DC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 151-165. DOI: 10.1186/s41601-020-00157-9.
- [4] MUNIAPPAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20. DOI: 10.1186/s41601-020-00173-9.
- [5] 张浩, 刘欣和, 王先为, 等. 柔性直流输电系统 MMC 换流阀闭环充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 134-142.
ZHANG Hao, LIU Xinhe, WANG Xianwei, et al. Closed-loop charging strategy of MMC in flexible DC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 134-142.
- [6] WEN Yunfeng, CHUNG C Y, SHUAI Zhikang, et al. Toward flexible risk-limiting operation of multi-terminal HVDC grids with vast wind generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1750-1760.
- [7] 李斌, 何佳伟. 柔性直流配电系统故障分析及限流方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3026-3036.
LI Bin, HE Jiawei. DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3026-3036.
- [8] MARIUS L, GIOVANNI D C, MARCO L, et al. Fault

- current estimation in multi-terminal HVDC grids considering MMC control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(3): 2179-2189.
- [9] XU Jianzhong, ZHAO Xibei, JING Hao, et al. DC fault current clearance at the source side of HVDC grid using hybrid MMC[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 35(1): 140-149.
- [10] CWIKOWSKI O, WICKRAMASINGHE H R, KONSTANTINOOU G, et al. Modular multilevel converter DC fault protection[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 33(1): 291-300.
- [11] GONG Wenming, ZHU Zhe, XU Shukai, et al. High efficient modeling of a diode clamped modular multilevel converter for EMT simulation[C] // *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, October 23-26, 2016, Florence, Italy: 2538-2543.
- [12] WANG Nan, SHI Yan, HAN Deshun, et al. Study on a new type MMC hybrid double sub-module topology and control strategy[C] // *International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI)*, November 8-10, 2019, Nanjing, China: 233-238.
- [13] LIAO Jianquan, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. A bypass LCC-based DC fault isolation scheme for bipolar MMC-HVDC[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 118218-118228.
- [14] 周猛, 向往, 林卫星, 等. 柔性直流电网直流线路故障主动限流控制[J]. *电网技术*, 2018, 42(7): 2062-2072.
ZHOU Meng, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Active current-limiting control to handle overhead line fault in DC grid[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(7): 2062-2072.
- [15] 廖敏, 许韦华, 杨杰, 等. 考虑子模块均压约束的混合型模块化多电平换流器功率极限分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(5): 17-25.
LIAO Min, XU Weihua, YANG Jie, et al. Analysis of maximum power operating region for hybrid MMC considering sub-module balancing constraint[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(5): 17-25.
- [16] XIAO Yuntao, PENG Li. A novel fault ride-through strategy based on capacitor energy storage inside MMC[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(8): 7960-7971.
- [17] 马焕, 姚为正, 吴金龙, 等. 含桥臂阻尼的 MMC-HVDC 直流双极短路故障机理分析[J]. *电网技术*, 2017, 41(7): 2099-2106.
MA Huan, YAO Weizheng, WU Jinlong, et al. Analysis of DC pole-to-pole short circuit fault behavior in MMC-HVDC transmission systems with bridge arm damper[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(7): 2099-2106.
- [18] 司志磊, 陆翌, 韩坤, 等. 基于桥臂阻尼阀组的模块化多电平换流器故障快速清除与系统恢复技术[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(4): 60-67, 74.
SI Zhilei, LU Yi, HAN Kun, et al. Fast fault clearance and system recovery technology of MMC based on bridge-arm damping valve groups[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(4): 60-67, 74.
- [19] 王有云, 杨晓峰, 李泽杰, 等. 一种基于桥臂耦合电感的自然限流型模块化多电平换流器[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(增刊 2): 479-488.
WANG Youyun, YANG Xiaofeng, LI Zejie, et al. Arm coupling inductor based natural current limiting modular multilevel converter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(S2): 479-488.
- [20] YANG Xiaofeng, XUE Yao, CHEN Bowei, et al. Novel modular multilevel converter against DC faults for HVDC applications[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2017, 3(2): 140-149.
- [21] JIANG Zhe, WANG Yinshun, DAI Shaotao, et al. Application and design of resistive SFCL in ± 160 kV MMC-HVDC system[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(5).
- [22] LEE H Y, ASIF M, PARK K H, et al. Assessment of appropriate SFCL type considering DC fault interruption in full bridge modular multilevel converter HVDC system[J]. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 2019, 563: 1-6.
- [23] ZHA Wenhan, QIU Qingquan, CAO Shaoqun, et al. Quench and recovery characteristics of solenoid and pancake SFCLs under DC impact current[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, 30(3).
- [24] XIANG Bin, LUO Jinhui, GAO Lei, et al. Study on the parameter requirements for resistive-type superconducting fault current limiters combined with mechanical DC circuit breakers in hybrid AC/DC transmission grids[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 35(6): 2865-2875.
- [25] SUN Jianlong, DU Jian, LI Yan, et al. Design and performance test of a 20 kV DC superconducting fault current limiter[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, 30(2).
- [26] TAN Xiangyu, REN Li, LIANG Siyuan, et al. Analysis of R-SFCL with shunt resistor in MMC-HVDC system using novel R-Q method[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, 30(4).
- [27] 金晶, 殷勤. 含电阻型超导限流器的南澳柔性直流系统故障特性分析[J]. *高压电器*, 2020, 56(12): 286-291.
JIN Jing, YIN Qin. Fault characteristics analysis of Nan'ao flexible DC system with resistance superconducting

- current limiter[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(12): 286-291.
- [28] 周光阳, 李妍, 何大瑞, 等. 含限流器的多端柔直系统故障保护策略[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(7): 1432-1443.
ZHOU Guangyang, LI Yan, HE Darui, et al. Protection scheme for VSC-MTDC system with fault current limiter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(7): 1432-1443.
- [29] CHEN Lei, CHEN Hongkun, SHU Zhengyu, et al. Comparison of inductive and resistive SFCL to robustness improvement of a VSC-HVDC system with wind plants against DC fault[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26(7).
- [30] CHEN Lei, HE Huiwen, LI Guocheng, et al. Study of resistive-type superconducting fault current limiters for a hybrid high voltage direct current system[J]. *Materials*, 2019, 12(1): 26-45.
- [31] CHEN Lei, LI Guocheng, HE Huiwen, et al. Study on coordination of resistive SFCLs and hybrid-type circuit breakers to protect a HVDC system with LCC and VSC stations[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, 30(4).
- [32] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(19): 119-127.
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method of a hybrid HVDC system based on the coordination of a fault current limiter and a DC circuit breaker[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(19): 119-127.
- [33] QIU Qingquan, XIAO Liye, ZHANG Jingye, et al. Design and test of 40 kV/2 kA DC superconducting fault current limiter[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, 30(6).
- [34] XIAO Yu, PENG Sunhonghao, WU Yifei, et al. Analysis of the energy dissipation characteristic in an MMC-based MVDC system with the liquid metal current limiter[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(5): 5521-5532.
- [35] 官二勇, 董新洲, 冯腾. 一种固态直流限流器拓扑结构[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(4): 978-986.
GUAN Eryong, DONG Xinzhou, FENG Teng. A solid DC current limiter topology[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(4): 978-986.
- [36] FU Zhengzheng, SIMA Wenxia, YANG Ming, et al. A mutual-inductance-type fault current limiter in MMC-HVDC systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 35(5): 2403-2413.
- [37] 赵西贝, 许建中, 苑津莎, 等. 一种新型电容换相混合式直流限流器[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(23): 6915-6923, 7125.
ZHAO Xibei, XU Jianzhong, YUAN Jinsha, et al. A novel capacitor commutated hybrid DC fault current limiter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(23): 6915-6923, 7125.
- [38] XU Jianzhong, ZHAO Xibei, HAN Naizheng, et al. A thyristor-based DC fault current limiter with inductor inserting-bypassing capability[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2019, 7(3): 1748-1757.
- [39] ZHOU Hang, YUAN Jiaxin, WEI Liangliang, et al. Topology and performance optimization of a novel hybrid material-based direct current fault current limiter[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, 54(11).
- [40] LI Botong, CUI Hanqing, JING Fangjie, et al. Current-limiting characteristics of saturated iron-core fault current limiters in VSC-HVDC systems based on electromagnetic energy conversion mechanism[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2019, 7(2): 412-421.
- [41] NA J B, KIM Y J, JANG J Y, et al. Design and tests of prototype hybrid superconducting fault current limiter with fast switch[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2012, 22(3).
- [42] CHEN Lei, DENG Changhong, ZHENG Feng, et al. Fault ride-through capability enhancement of DFIG-based wind turbine with a flux-coupling-type SFCL employed at different locations[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2015, 25(3).
- [43] HE Huiwen, CHEN Lei, YIN Ting, et al. Application of a SFCL for fault ride-through capability enhancement of DG in a microgrid system and relay protection coordination[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26(7).
- [44] CHEN Lei, CHEN Hongkun, YANG Jun, et al. Conceptual design and performance evaluation of a 35 kV/500-A flux-coupling-type SFCL for protection of a DFIG-based wind farm[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28(3).
- [45] CHEN Lei, LI Guocheng, CHEN Hongkun, et al. Investigation of a modified flux-coupling-type SFCL for low-voltage ride-through fulfillment of a virtual synchronous generator[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, 30(4).
- [46] LIANG Siyuan, TANG Yuejin, XIA Zhong, et al. Study on the current limiting performance of a novel SFCL in DC systems[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, 27(4).
- [47] LIANG Siyuan, TANG Yuejin, REN Li, et al. Tests and analysis of a small-scale hybrid-type DC SFCL prototype[J].

- IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(4).
- [48] 张帆, 许建中, 苑宾, 等. 基于虚拟阻抗的 MMC 交、直流侧故障过电流抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2103-2113.
ZHANG Fan, XU Jianzhong, YUAN Bin, et al. Over current suppression control for AC and DC faults of modular multilevel converters based on virtual impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2103-2113.
- [49] 丁然, 梅军, 管州, 等. 适用于 MMC 型直流变压器的直流故障主动限流控制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 131-138.
DING Ran, MEI Jun, GUAN Zhou, et al. Active current limiting control method for DC fault of MMC based DC transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 131-138.
- [50] 倪斌业, 向往, 周猛, 等. 柔性直流电网紧急限流控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3527-3537.
NI Binye, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. Research on the emergency current-limiting control in VSC-HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3527-3537.
- [51] 李国庆, 杨勇, 辛业春, 等. 基于桥臂电压控制的 MMC 直流短路主动限流方法[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 144-152.
LI Guoqing, YANG Yong, XIN Yechun, et al. Active current-limiting method of MMC to handle DC short-circuit based on bridge arm voltage control[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 144-152.
- [52] LI Rui, XU Lie, HOLLIDAY Derrick, et al. Continuous operation of radial multiterminal HVDC systems under DC fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 351-361.
- [53] LACERDA V A, MONARO R M, PENA-ALZOL R, et al. Control-based fault current limiter for modular multilevel voltage-source converters[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 118.
- [54] 倪斌业, 向往, 周猛, 等. 半桥 MMC 型柔性直流电网自适应限流控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5609-5620.
NI Binye, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. Research on adaptive-current-limiting control of VSC-HVDC grid based on half-bridge MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5609-5620.
- [55] NI Binye, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. An adaptive fault current limiting control for MMC and its application in DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 920-931.
- [56] 张明奇, 张英敏, 陈可. 基于主动控制的换流器与直流断路器的协调控制[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 90-96, 102.
ZHANG Mingqi, ZHANG Yingmin, CHEN Ke. Coordinated control of converter and DC breaker based on active control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 90-96, 102.
- [57] 赵成勇, 宋冰倩, 许建中. 柔性直流电网故障电流主动控制典型方案综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 3-13.
ZHAO Chengyong, SONG Bingqian, XU Jianzhong. Overview on typical schemes for active control of fault current in flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 3-13.
- [58] 王振浩, 田奇, 成龙, 等. 混合式高压直流断路器暂态分断特性及其参数影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 1-10.
WANG Zhenhao, TIAN Qi, CHENG Long, et al. Transient breaking characteristics and its parameter influence analysis of hybrid DC circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 1-10.
- [59] 王振浩, 张力斌, 成龙, 等. 一种具备限流功能的混合式高压直流断路器[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 2042-2049.
WANG Zhenhao, ZHANG Libin, CHENG Long, et al. A hybrid high voltage DC circuit breaker with current limiting function[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 2042-2049.
- [60] 张悛宁, 罗易萍, 洪妍妍. 基于多端口混合直流断路器的 LCC-VSC 混合多端直流输电系统故障清除方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 146-153.
ZHANG Yining, LUO Yiping, HONG Yanyan. Multi-port DC circuit breaker-based fault clearing scheme for LCC-VSC hybrid multi-terminal HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 146-153.

收稿日期: 2021-01-19; 修回日期: 2021-04-28

作者简介:

陈磊(1982—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为故障限流器及系统应用; E-mail: chen_lei@whu.edu.cn

何慧雯(1983—), 女, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为高压直流输电; E-mail: hushthw@126.com

王磊(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高压直流输电。E-mail: wanglei8@epri.sgcc.com.cn

(编辑 姜新丽)