

混合级联 UHVDC 系统换相失败抑制分析

刘磊, 李小鹏, 滕予非

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:换相失败是基于电网换相换流器的特高压直流输电系统中最常见的故障类型之一。近年来新投运的混合级联特高压直流输电系统的逆变侧仍包含电网换相换流器,因此换相失败无法避免。首先,在分析电网换相换流器触发调节过程的基础上,明确了换相失败控制的投入时刻是影响换相失败抑制效果的关键因素;进一步地,结合白鹤滩—江苏混合级联特高压直流输电受端的结构特点和接入交流系统方式,分析了混合级联拓扑下的换相失败抑制新思路;最后,提出可充分利用逆变侧电压观测点增加、模块化多电平变流器所连接母线的电压响应更为灵敏的特点,来加快换相失败控制的投入速度,提升系统的换相失败抑制性能。基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台验证了该分析的正确性。

关键词:特高压直流输电;混合级联;换相失败;控制策略

中图分类号:TM 732 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2024)02-0001-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240201

Analysis of Commutation Failure Mitigation in Hybrid-cascaded UHVDC System

LIU Lei, LI Xiaopeng, TENG Yufei

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:Commutation failure is one of the most common types of failures in line commutated converter based ultra-high voltage direct current (LCC-UHVDC) system. In recent years, the inverter side of the newly installed hybrid-cascaded UHVDC system still contains LCC, so the commutation failure is unavoidable. Based on the analysis of trigger regulation process of LCC, it is clear that the input time of commutation failure control is the key factor affecting the effect of commutation failure suppression. Further, according to the structure characteristics of receiving end of Baihetan-Jiangsu hybrid-cascaded UHVDC and the access mode of AC system, a new idea of commutating failure suppression under hybrid-cascaded topology is analyzed. It is proposed to fully utilize the increased voltage observation points of inverter, and enhance the sensitivity of bus voltage response connected to modular multilevel converter (MMC), which can accelerate the startup speed of commutation failure control and the suppression performance of commutation failure. The correctness of analysis is verified by PSCAD/EMTDC simulation platform.

Key words: UHVDC; hybrid-cascaded; commutation failure; control strategy

0 引言

传统特高压直流输电 (ultra-high voltage direct current, UHVDC) 系统中的电网换相换流器 (line-commutated converter, LCC) 采用无自关断能力的晶闸管作为换流元件,存在换相失败问题。换相失败

会引起直流电流短时激增,并造成直流功率大量损失,连续换相失败甚至可能引起直流系统闭锁,严重威胁电网的安全稳定运行。同时,随着更多直流工程的相继建成、投运,中国电网“强直弱交、多回直流集中馈入”的特征日益突出,使得换相失败问题愈发显著^[1]。

换相失败只发生于 LCC-UHVDC,在基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)

的柔性直流输电系统中并不存在。然而,为综合 LCC 与 MMC 的技术优势,新投运的白鹤滩—江苏 UHVDC 工程(以下简称白—江工程)在世界上首次采用了 MMC 与 LCC 混合级联的特高压直流输电技术,系统的逆变侧同时包含 LCC 和 MMC 两种类型的换流器^[2-5]。LCC 的存在使得换相失败问题无法完全避免,同时,MMC 的引入也大大增加了系统运行及响应的复杂程度。

为了进一步提升混合级联 UHVDC 系统的换相失败抵御能力,充分发挥混合级联拓扑优势,下面从白—江工程的受端结构特点和接入交流系统方式入手,在分析 LCC 换流器触发调节过程及换相失败抑制关键影响因素的基础上,给出了混合级联 UHVDC 系统的换相失败抑制新思路;还提出可利用逆变侧电压观测点增加、MMC 所连接母线的电压响应更为灵敏的特点来加快换相失败控制的投入速度,从而提升系统的换相失败抑制性能。

1 混合级联 UHVDC 系统

白—江工程额定输送功率为 8000 MW,额定直流电压为 ± 800 kV,送端换流站位于四川攀西地区,受端换流站位于江苏省苏州地区,特高压直流线路路径全长约 2 087.4 km。系统的混合级联单极拓扑结构如图 1 所示,其整流侧拓扑与常规 UHVDC 系统相同,每极高、低端均为 12 脉动 LCC,所有换流器接入同一交流电网;逆变侧采用混合级联结构,高端为 12 脉动 LCC,低端采用 3 个 MMC 并联,不同换流器多落点接入交流系统。受端接入交流系统方案为:高端 LCC 就近 π 入斗山—常熟南 2 回 500 kV 线路,新建 1 回 LCC 至常熟南线路;低端 VSC1 单 π 入张家港—常熟北单线,VSC2、VSC3 各新建 2 回 500 kV 线路至木渎、玉山变电站。

2 LCC 换相失败与触发调节分析

2.1 换相过程与换相失败^[6]

混合级联 UHVDC 逆变侧高端 LCC 换流器的六脉动换流单元如图 2(a)所示。6 个阀臂以正常开通的次序编号,即 VT1 至 VT6。阀 VT1-VT4、VT3-VT6、VT5-VT2 分别构成 3 个阀对,阀对的中心端

A、B、C 为桥的交流端,分别连接于换流变压器阀侧的三相。 m 和 n 为桥直流端的两个极,两极之间形成直流电压 U_d 。换流器正常运行时,6 个阀按照固定顺序交替导通。当某个阀被触发导通后,同一半桥上已导通阀所在支路的电流将转移至新导通阀所在支路,由于电路中有电感存在,电流的转移不能瞬间完成,需要一个过程,称为换相过程。

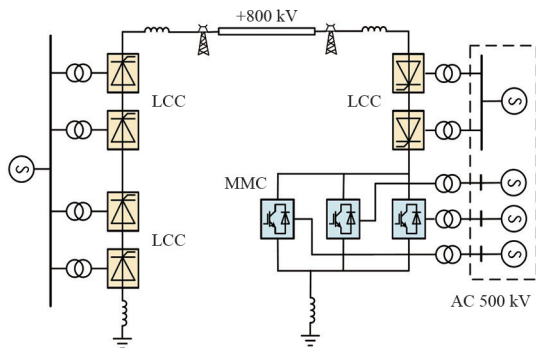
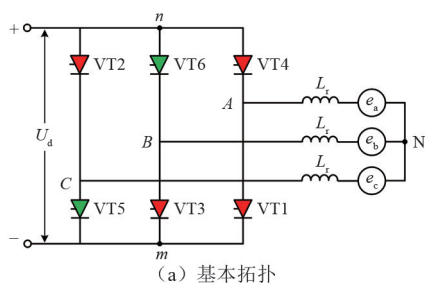
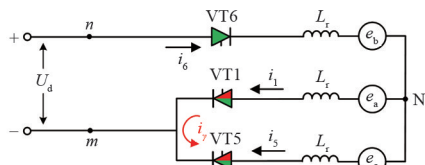


图 1 混合级联 UHVDC 单极拓扑结构



(a) 基本拓扑



(b) VT5-VT1 换相时的等效电路

图 2 LCC 换流器拓扑及换相等效电路

以阀 VT5 和 VT6 导通的初始状态为例,如果在阀 VT1 加触发脉冲,由于其承受正向电压,故立即开通,此时下半桥 VT5 和 VT1 同时导通,换流器等效电路如图 2(b)所示。图中, i_1 、 i_5 和 i_6 分别表示流过阀 VT1、VT5 和 VT6 的电流。在阀 VT1 开通后,换相电流 i_γ 为

$$i_\gamma = i_1 = \frac{\sqrt{2}E}{2\omega L_r}(-\cos\beta - \cos\omega t) \quad (1)$$

式中: E 为交流线电压有效值; ω 为交流系统基波角频率; L_r 为换相电感; β 为换流器的越前触发角。可以看出, i_γ 将随着 ωt 的增大而逐渐增大,同时 i_1 增

大, i_5 减小。经过一定的换相重叠角 μ 之后, i_1 增大至电流 I_d , 而 i_5 降低至 0。由于阀的单相导电特性, i_5 无法反向故保持于 0 值, i_1 也不再增大保持于 I_d 。此后阀 VT5 关断, 换相过程结束, 换流器再次由 3 个阀 (VT5、VT6、VT1) 导通改变为 2 个阀 (VT6、VT1) 导通的状态。

实际上, 阀的关断并非瞬时完成, 需在反向电压下维持一段时间才能恢复正向阻断能力。在换相过程刚结束后, 如果刚退出导通的阀在反向电压作用的一段时间内未能恢复阻断能力, 或换相过程未能结束, 那么电压转向后, 被换相的阀将向原来预定退出导通的阀倒换相, 即发生换相失败。

2.2 换流器触发调节分析

换相失败发生与否的决定性因素是换相结束时时刻至换相电压过零时刻之间对应的电角度, 即关断角 γ 。

$$\gamma = \beta - \mu = \pi - \alpha - \mu \quad (2)$$

式中, α 为触发角。由式 (2) 可知, 关断角 γ 的大小取决于触发角 α 和换相重叠角 μ 。换相重叠角 μ 由式 (3) 决定。

$$2L_r I_d = \int_{\alpha}^{\alpha+\mu} e(\omega t) d(\omega t) \quad (3)$$

式中, $e(\omega t)$ 为两个阀臂之间承受的线电压。可以看出, 除直流电流和换相电压之外, 换相重叠角 μ 也受触发角 α 的影响。因此, 精准、合理地控制触发角 α 对于抑制换相失败具有重要意义。

LCC 的触发调节如图 3 所示。控制系统根据系统电气量的实时状态, 通过一系列运算环节后得出触发角 α , 进而生成换流器的触发信号, 即在特定的时刻 (相位) 触发导通某一个阀。在不考虑电气量采样间隔的条件下, 控制系统的响应是实时的, 但实际上作用于换流阀的触发信号是高度离散的, 对于六脉动换流器而言, 每个周波只触发 6 次。

上述特点决定了基于控制手段的换相失败抑制方法均对灵敏性有较高要求。一旦一次触发生成之后, 本次换相过程将无法调节, 即使本次触发后控制系统立即减小了触发角, 但该效果只能作用于下一次触发, 无法解决本次换相所面临的换相失败风险。因此, 逆变侧交流系统发生故障后, 换相失败抑制策略宜尽早动作, 尽可能对即将发生的换相过程进行提前干预、调节。

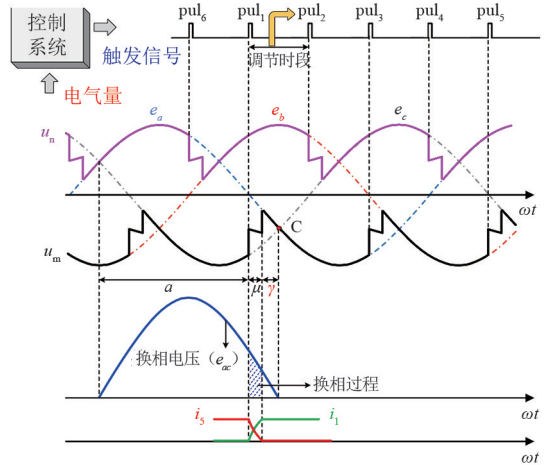


图 3 LCC 触发调节

3 混合级联 UHVDC 换相失败抑制新思路

3.1 混合级联 UHVDC 受端接入交流系统特点

根据第 1 章所述, 给出白—江混合级联 UHVDC 系统的受端接入方案, 如图 4 所示。各个站内节点、接入点之间具有电气耦合, 图中以等值阻抗的形式进行简化示意。

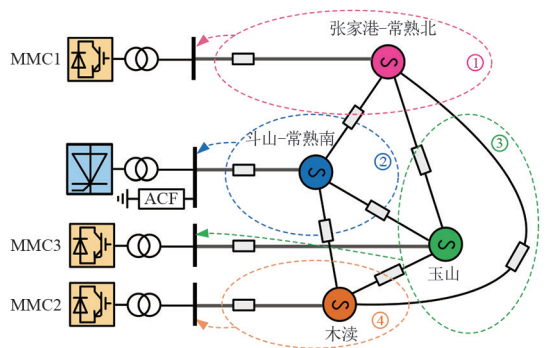


图 4 白—江混合级联 UHVDC 系统受端接入交流系统方案

常规 UHVDC 系统的逆变侧站内仅有一个 500 kV 电气节点单独接入交流系统。而对于混合级联 UHVDC 系统的逆变侧而言, 高端 LCC 阀组、MMC1、MMC2 和 MMC3 分别连接至不同的 500 kV 电气节点, 且各节点受端换流器所连接交流母线之间分散接入受端交流系统, 从而形成兼顾多个负荷中心电力需求的多直流落点布局, 并降低逆变站 LCC 和 MMC 并联组间发生直流故障的概率, 提高系统运行的可靠性。

文献 [7] 进一步给出了受端换流器所连接交流母线之间的耦合阻抗如表 1 所示。由表 1 可知,

MMC3 所连接母线和受端其余换流器之间的电气耦合最弱,而 MMC1 和 LCC 及 MMC2 耦合最强。

表 1 交流母线之间的耦合阻抗

	LCC	MMC1	MMC2	MMC3
LCC	$R=2.04$ $L=30.88$	$L=84.13$	$L=205.82$	$L=1115.80$
MMC1		$R=8.04$ $L=43.19$	$R=0.13$ $L=24.10$	$L=498.09$
MMC2			$R=4.47$ $L=38.58$	$L=1097.40$
MMC3				$R=1.67$ $L=26.32$

注: R 的单位为 Ω , L 的单位为 mH。

3.2 换相失败抑制新思路

LCC 换相失败最主要的原因是交流母线电压跌落导致换相电压不足,而交流母线电压跌落往往由接入的交流系统故障导致。对于混合级联 UHVDC 系统而言,受端相当于接入多个交流系统区域,如图 4 虚线框所示,各母线的电压受其直接连接区域内的交流故障影响最大。需要注意的是,MMC 并不会发生换相失败,但 MMC 母线连接的区域①、③、④内较为严重的故障可能通过电气耦合导致 LCC 发生换相失败。在这种情况下,虽然换相失败发生于 LCC,但实际上故障区域所直接连接的交流母线电压跌落更大(如故障发生于区域①时,MMC1 连接的交流母线电压跌落更严重)。因此,混合级联 UHVDC 的受端接入形式相当于将交流系统内的多点电压信息汇聚在一个直流换流站内,在不同故障位置、不同故障严重程度下,会出现不同的电压响应组合。基于此,有望通过更丰富的电压信息,提升故障判定速度和准确度,提升换相失败抑制效果。

另一方面,LCC 所连接的交流母线上配置有交流滤波器,而滤波器中存在大量电容元件,电容电压不可突变的特点制约了故障后 LCC 交流母线电压的下降速度,并不利于故障的快速判别。而 MMC 具有独立控制有功功率、无功功率的能力,MMC 所连接的交流母线上不需要滤波器来补偿无功功率,因此交流系统故障后母线电压的响应灵敏度大大提升。因此,混合级联 UHVDC 系统引入逆变侧 MMC 后,有望利用 MMC 母线电压快速响应的特点,创新故障判据,从而加速故障后换相失败控制措施的投入。

总的来说,混合级联 UHVDC 换相失败抑制新思路主要可从两方面入手:1) 逆变侧电压观测点增加,可以获得更多维度的故障数据;2) 逆变侧交流系统故障后 MMC 母线响应更为灵敏,可以构造更

合理的故障判据。二者均有助于加快换相失败辅助控制的投入速度,提升系统的换相失败抑制性能。

4 仿真分析

基于 PSCAD/EMTDC 平台混合级联 UHVDC 系统的仿真模型,参考白一江工程实际参数,受端交流系统利用表 1 中各交流节点之间的耦合阻抗近似等效。结合一组仿真案例补充说明上述分析结论:设置在 LCC 和 MMC1 换流母线交流近区发生三相接地故障,故障距离 LCC 和 MMC1 母线的电气距离相同,即故障位置与母线之间的等值阻抗均为两条母线之间等值阻抗的一半,如图 5 所示。故障时刻设置为 1.610 s,故障电阻设置为 20Ω 。仿真分析故障后母线的电压瞬时值,以及传统换相失败预测控制中电压跌落指标(换流母线三相电压转换至静止坐标系下的 $U_{\alpha\beta}$ 幅值^[8])的变化情况,仿真结果如图 6 所示。

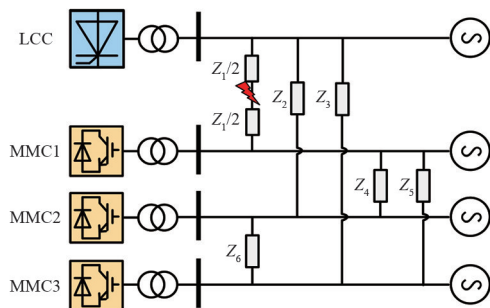


图 5 故障位置设置

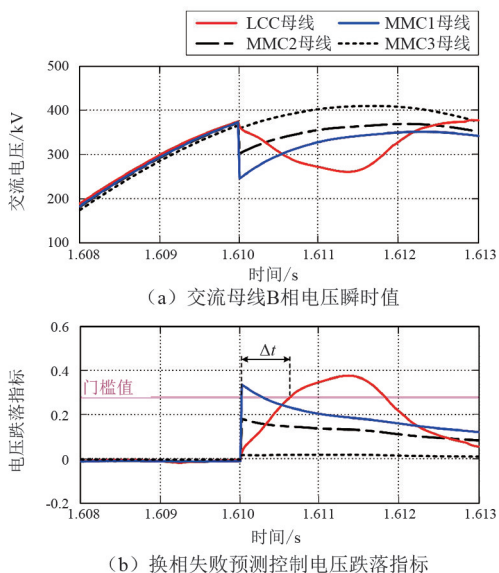


图 6 仿真结果

(下转第 69 页)

大气硫沉降模拟[J]. 环境科学研究, 2012, 25(10): 1115-1119.

- [15] 电力行业绝缘子标准化技术委员会. 现场污秽度测量及评定 第 1 部分: 一般原则: DL/T 1884.1—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [16] 殷峰, 仲昭峰, 高旭, 等. 基于风沙区域绝缘子故障数据的配电线路风险评估方法[J]. 供用电, 2020, 37(11): 28-33.
- [17] 姜雄峰. 石墨烯/碳纳米管杂化材料改性导电涂料的研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- [18] LI Yingping, ZHANG Hongming, WANG Xianhong, et al.

Growth kinetics of oxide films at the polyaniline/mild steel interface[J]. Corrosion Science, 2011, 53(12): 4044-4049.

作者简介:

郭利瑞(1980), 男, 高级工程师, 研究方向为输变电运行维护技术;

张睿(1987), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为输变电运行维护技术;

吴驰(1983), 男, 硕士, 高级工程师, 从事变电运行维护技术。

(收稿日期: 2023-09-26)

(上接第 4 页)

在图 6 中, LCC、MMC1 母线对应的量分别用红色、蓝色实线表示, MMC2、MMC3 对应的量用黑色虚线表示。对比图 6(a) 中红色、蓝色曲线可知, 在相同的电气距离外发生交流系统故障时, 由于 LCC 母线上配置交流滤波器, 其母线电压瞬时值缓慢振荡下跌, 故障后 1.4 ms 下降至最低点 240 kV, 而 MMC1 母线电压瞬时值的下跌更为快速, 故障后 0.1 ms 之内即可下降至 240 kV。相比之下, 交流系统故障后 MMC 母线的电压变化特征比 LCC 母线更为清晰, 更有利于实现服务于换相失败快速控制的故障判别。另外, 对比图 6(a) 中红色实线与黑色虚线可知, 对于 MMC 母线而言, 故障点距离母线的距离越远, 电压跌落越小, 但故障后电压的下降速度基本一致, 均无 LCC 母线的振荡下跌过程。

观察图 6(b) 中红色、蓝色曲线, 对比利用 MMC 和 LCC 母线电压计算获得的电压跌落指标可知, 前者在故障后的响应更为灵敏。假设基于电压跌落指标的换相失败预测控制启动门槛如图 6(b) 中标注所示, 则采用 MMC 母线电压后控制的投入时间可以提前 Δt , 将更有利于换相失败抑制。

5 结 论

上面针对白鹤滩—江苏 UHVDC 工程新型混合级联拓扑, 结合其受端结构特点和接入交流系统方式, 分析了换流器的触发调节特点和换相失败抑制新思路, 以期对混合级联 UHVDC 的换相失败抑制提供技术参考。主要结论如下:

1) 不考虑电气量采样间隔的条件下, LCC 的触发信号高度离散。该特点对于换相失败控制手段在故障后的响应速度提出了更高要求, 一旦一次触发生成, 本次换相过程将无法调节, 控制效果只能作用于下一次触发。

2) 相比于常规直流, 混合级联 UHVDC 的逆变侧站内有多个 500 kV 节点且分散接入交流系统, 可获得的电压信息更为丰富; 此外, MMC 所连接交流母线未配置交流滤波器, 在交流系统故障下母线电压响应更灵敏。因此, 可从故障信息扩充、故障判据优化两方面入手发挥混合级联拓扑优势, 提升 UHVDC 系统的换相失败抵御能力。

参考文献

- [1] 郭春义, 赵剑, 刘炜, 等. 抑制高压直流输电系统换相失败方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(S1): 1-10.
- [2] 王永平, 赵文强, 杨建明, 等. 混合直流输电技术及发展分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 156-167.
- [3] 刘泽洪, 马为民, 王绍武, 等. 混合级联特高压直流输电系统方案设计及动模试验验证[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1214-1222.
- [4] 徐政, 王世佳, 张哲任, 等. LCC-MMC 混合级联型直流输电系统受端接线和控制方式[J]. 电力建设, 2018, 39(7): 115-122.
- [5] 许烽, 宣晓华, 江道灼, 等. 常规直流输电系统改造用的混合直流输电技术[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3209-3215.
- [6] 刘磊. 高压直流输电系统换相失败抑制的控制策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [7] NIU C, YANG M J, XUE R, et al. Research on inverter side AC fault ride-through strategy for hybrid cascaded multi-terminal HVDC system[C]. 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), IEEE, 2020.
- [8] 李程昊, 刘畅, 张振安, 等. 计及换相失败预测控制和故障合闸角的 HVDC 换相失败分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 56-63.

作者简介:

刘磊(1993), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为特高压直流输电控制与保护。

(收稿日期: 2023-06-13)