# 适用于常规直流改造的混合直流输电系统主电路拓扑研究

赵文强1,宣佳卓2,陆 翌2,李继红3,王永平1,汪楠楠1.卢 字1

(1. 南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211106;2. 国网浙江省电力有限公司

电力科学研究院,浙江 杭州 310014;3. 国网浙江省电力有限公司,浙江 杭州 310000)

摘要:分析比较了适用于混合直流输电系统的2种主接线方式的优缺点,针对常规直流改造为混合直流的特 点,指出了适用于常规直流改造为混合直流的主接线方式。针对柔性直流架空线路故障隔离困难的问题,分 析对比了4种可行的处理方法,指出了每种方法的优缺点及适用场合,并指出了适用于常规直流改造为混合 直流的架空线故障处理方法。结合上述架空线故障处理方法,分析总结了工程中可行的4种适用于常规直 流改造为混合直流的拓扑结构,并提出了2种非对称子模块混合型混合直流输电拓扑结构。从技术性和经 济性两方面对这6种拓扑结构进行了对比分析,并指出了每种拓扑结构的适用场合。

关键词:柔性直流输电;模块化多电平换流器;混合直流输电;电路拓扑

中图分类号:TM 46;TM 721.1 文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.12.028

0 引言

自1954年世界上第一个直流输电工程建成以 来,高压直流输电技术持续发展,目前世界上已有一 百多个高压直流输电工程建成投运,其中,基于电网 换相换流器的高压直流输电(LCC-HVDC)系统经过 四十多年的发展,技术已非常成熟<sup>[1]</sup>。目前 LCC-HVDC 广泛用于远距离大容量输电、异步电网互联 等场合。然而,LCC-HVDC 由于换相对所连交流电 网有要求,存在逆变侧易发生换相失败、无法对弱交 流系统供电、无法实现无源运行、运行过程中需消耗 大量无功功率等缺陷,在一定程度上限制了它的进 一步发展。此外,在我国的华东电网和南方电网地 区 LCC-HVDC 直流落点密集,一旦发生交流系统故 障可能导致多回直流同时发生换相失败,进一步导 致功率缺失,对受端交流电网的稳定性造成了严重 威胁<sup>[2-4]</sup>。

近年来,基于电压源型换流器的高压直流输电 (VSC-HVDC)系统因其有功功率和无功功率可以实 现解耦控制,无需无功功率补偿,结构紧凑占地面积 小,无需交流电网的短路容量支持换相,不存在换相 失败,从而解决了直流输电向弱系统或无源电网供 电的问题,得到了学术界和工业界的广泛青睐<sup>[5]</sup>。 但是 VSC-HVDC 造价昂贵、运行损耗大,系统传输 容量相较于 LCC-HVDC 仍有较大差距,更为重要的 是其无法经济有效地处理直流架空线路故障,制约 了其在远距离大功率输电场合的运用<sup>[6]</sup>。

在 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 系统的基础上, 1992年有学者提出了混合直流输电的概念,称之为

收稿日期:2017-08-30:修回日期:2018-08-15

基金项目:国网浙江省电力公司科技项目(5211ZS1500GB) Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (5211ZS1500GB)

混合高压直流输电(hybrid HVDC)系统<sup>[7]</sup>。近年 来,随着新型大功率电力电子器件的不断涌现及器 件电压和电流水平的不断提升,特别是 2001 年,由 德国学者提出的基于模块化多电平换流器的高压直 流输电(MMC-HVDC)系统的出现<sup>[8]</sup>,混合高压直流 输电技术开始得到了广泛关注,并不断有混合直流 输电工程投入运行,有学者提出通过将现有的常规 直流输电工程的受端换流站升级改造为柔性直流换 流站,构成混合直流输电系统,从而解决多馈入直流 输电的困扰<sup>[9]</sup>。现有文献从混合直流输电的基本原 理、拓扑结构、控制与保护方法等方面进行了大量研 究[10-13],但针对适用于常规直流改造的混合直流输 电主电路拓扑进行系统研究的文献较少,因此有必 要展开深入的研究。

本文从混合直流输电系统的主接线方式出发, 分析并指出了适用于混合直流输电系统的接线方 式;总结并分析了4种处理柔性直流架空线故障的 方法,指出了每种方法的优缺点,同时指出了适用于 常规直流改造为混合直流的架空线故障处理方法: 结合上述方法,总结分析了工程中可行的4种适用 于常规直流改造为混合直流的拓扑结构,并提出了 2种子模块混合非对称型混合直流输电拓扑结构, 从技术性和经济性两方面对这6种拓扑结构进行了 对比分析,指出了每种拓扑结构的适用场景;通过 PSCAD/EMTDC 仿真软件对相关分析进行了仿真 验证。

#### 混合直流主接线方式 1

混合直流输电系统的主接线兼具 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 系统的主接线方式。VSC-HVDC 系 统的接线方式依据换流器输出的直流电压极性分为 对称单极和双极2种接线方式。对称单极是指换流 器2个直流端子上输出的直流电压对称;不对称单 极是指换流器 2 个直流端子上输出的直流电压不对称,通常一端接地;双极是指 2 个或 2 个以上电压源型换流器(VSC)不对称单极构成 1 个双极直流,包括大地回线和金属回线 2 种运行方式。现有常规直流输电系统一般均采用双极接线方式,因此,混合直流输电系统一般也依据不同的应用场合,采用对称单极或双极 2 种接线方式,具体如图 1 所示。



#### 图1 混合直流输电系统的主接线方式

Fig.1 Main connection modes of hybrid HVDC system

图 1(a) 为采用对称单极接线方式的混合直流 输电系统,采用此种接线方式具有以下优点:结构简 单,柔直换流站设备数量少,造价低,损耗小;正常运 行时,柔直换流变压器不需要耐受直流偏置电压,可 采用普通变压器:直流线路单极接地情况下交流电 网不提供故障电流。然而此种接线方式也存在以下 缺点:单极设备故障将导致整个系统退出运行,可靠 性差: 直流线路发生单极接地故障后. 非故障极的对 地电压将上升至原来的2倍左右,这将给非故障极 的直流架空线路、柔直站换流变压器及阀侧交流设 备的对地绝缘水平带来挑战;只适用于容量较小的 直流工程,对于国内常见的 500 kV/3 000 MW 常规 **直流输电工程而言**.若要改造为此种接线方式的混 合直流工程,则 VSC-HVDC 换流站即使采用单相双 绕组联结变压器,每台的容量也将达到1160 MV·A, 这将给联结变压器的生产制造及运输带来极大的 困难。

图 1(b)为采用双极接线方式的混合直流输电 系统,采用此种接线方式具有以下优点:可实现换流 器冗余,当其中任何一极设备发生故障退出运行时, 剩余另一极仍可继续工作,甚至可以转代故障极的 功率,从而不造成功率损失影响所连交流系统的稳 定性。然而此种接线方式也存在如下缺点:相同的 输送容量下与对称单极接线相比成本较高,占地较 大;接地极需要特殊设计(需要对环境影响进行评 估,得到许可);换流变压器需要承受直流偏置电压。

此外,双极接线方式下当输电线路或换流站的 一个极因故障退出运行时,健全极可以依据情况转 为如下3种单极运行方式:单极大地回线,单极金属 回线,单极双线并联大地回线。同时还可以利用健 全极的过负荷能力,减少功率损失,减小对两端交流 电网的冲击。因此双极接线方式具有较高的运行可 靠性和灵活性,且此种接线方式也最适合于常规直 流改造为混合直流。

# 2 处理直流架空线路故障的方法

直流架空线路故障隔离与恢复是实现远距离大容量直流输电的关键技术。对于常规直流输电系统,通过控制晶闸管换流器快速移相,可以迅速清除暂态直流短路故障电流,从而实现直流输电系统的快速再启动。而基于半桥子模块的模块化多电平换流器(MMC)并不能通过换流器的自身动作来处理直流架空线路故障,其原因在于半桥子模块拓扑结构中即使所有绝缘栅双极型晶体管(IGBT)全部关断,交流系统仍可通过IGBT反并联的二极管向故障点馈入电流,这对于交流系统的影响而言相当于三相短路。理论上VSC-HVDC可以采用以下4种方式处理直流架空线路故障:方式 a,利用交流断路器;方式 b,利用直流断路器;方式 c,采用具有直流故障穿越能力的VSC;方式 d,采用电流源型换流器与VSC 组合。

方式 a 是目前主流的方法,国内外已投运的柔性直流工程均采用此方法。该方法最为经济,但交流断路器为机械开关,动作速度慢,且只能在电流过零点时切除故障。而实际发生直流线路故障时直流侧故障电流衰减较慢,若不引入桥臂阻尼装置<sup>[14]</sup>,线路发生故障后的电流衰减时间通常为数百毫秒<sup>[15]</sup>,整个系统的重启恢复时间较长,通常为秒级。 且故障期间换流器必须闭锁,这样会导致所连交流系统将不仅失去有功功率,也将失去无功功率,不利于交直流输电系统的暂态稳定性。

方式 b 是最易想到也最为直接的方法,但直流 断路器技术目前还不成熟,尚处在研究及工程试用 阶段且造价相当昂贵<sup>[16-17]</sup>。直流断路器的最大开断 电流能力受功率开关器件的限制,开断能力有限,因 此必须增加限流电抗以限制故障电流幅值,以及限 制故障电流上升速率,但加入过多的直流电抗器会 影响系统暂态特性,同时不利于直流断路器的快速 188

开断。考虑到直流断路器可以隔离故障,因此故障 期间换流器可以不闭锁,继续为所连交流系统提供 无功电压支撑。

方式 c 实际上是利用换流器的部分功能取代直 流断路器的作用,因此换流器必须采用特殊的方式 即能够输出负电平且具备直流线路故障穿越能力, 这类换流器主要有基于全桥子模块的模块化多电平 换流器(FB-MMC)、基于钳位双子模块的模块化多 电平换流器(C-MMC)等<sup>[18-20]</sup>。相比于工程上常用 的基于半桥子模块的模块化多电平换流器(HB-MMC),具备直流故障穿越能力的换流器采用的功 率器件数量较多,成本及损耗均较大,因而经济性较 差。然而此类换流器因可以输出负电平,因此可以 实现降压运行,甚至负电压运行,加快架空线路故障 电弧的熄灭,具备较高的技术灵活性<sup>[21]</sup>。且此类换 流器在故障期间可以不闭锁,继续为所连交流系统 提供无功电压支撑。

方式 d 实质是利用电流源型换流器的电流单向 流通特性来阻断直流线路故障电流。依据电流源型 换流器的形式不同,目前主要有2种结构:二极管阀+ HB-MMC 和晶闸管阀+HB-MMC。其中二极管阀+ HB-MMC 结构较为简单,只需在每极直流线路上串 联一个二极管阀即可。此种方案可以实现直流线路 故障穿越,换流器不需闭锁仍可继续为所连交流系 统提供无功电压支撑。但此方案下直流功率只能单 向传输,同时增加的二极管阀需承担相当于额定直 流电压的反向电压,因此工程上要实现该二极管阀, 需要考虑占地和散热问题。而晶闸管阀+HB-MMC 则是通过晶闸管阀与 HB-MMC 相串联组成一个新 的换流单元,此种结构可以提高系统直流电压水平 至 800 kV. 功率达到 5 000 MW<sup>[22-23]</sup>, 与现有基于晶 闸管换流器技术的特高压直流输电系统的功率电压 水平相当。此方案下直流功率也只能单向传输,在 工程应用中需考虑晶闸管阀的设计、占地与散热问 题,同时还需考虑晶闸管阀与 HB-MMC 的协调控制 及晶闸管阀的谐波对 HB-MMC 的影响。

表1对上述4种处理直流架空线路故障方式的 特性进行了比较,每种方式都有各自的适用场合。 表中成本、损耗均为标幺值,后同。方式a适用于送 端和受端电网均较强的直流工程,且对直流架空线 路故障重启没有太高要求的工程。此种方式并不适 用于我国常规直流的混合直流改造。方式 b 适用于 对经济性要求不是很高,电压等级及容量均适中的 多端直流工程。对于两端直流工程,尤其是混合直 流工程而言没有采用此方式的必要性。方式 c 的适 用性最强,各种情况的直流工程均适用,但经济性偏 低,此方式适用于常规直流的混合直流改造。方式 d则在大容量远距离功率单向传输的工程中有一定 优势,此方式也适用于常规直流的混合直流改造。 下文将结合方式 c 和方式 d 对混合直流主回路拓扑 进行对比分析。

# 3 混合直流主电路拓扑

将常规直流输电系统改造为混合直流输电系统,关键在于改造后的柔性直流换流站,它的性能决定了整个混合直流的性能。为了与整流站 LCC 配合,VSC 需具备 2 个关键性能:直流架空线路故障处理能力,快速大范围直流电压调节能力。

为了具备常规直流的直流架空线路故障重启功 能,受端的柔性直流换流站必须能够处理直流故障。 结合第2节的分析,柔性直流换流站可优选以下2 种方式来处理直流故障:采用具有直流故障穿越能 力的 VSC;采用电流源型换流器与 VSC 组合。目前 工程中 VSC 主要采用 MMC,而其中较为成熟的子模 块主要有3种,如图2所示。其中使用图2(b)所示 的全桥子模块构成的 MMC 具备直流故障穿越能力, 由其构成的混合直流主电路拓扑结构示意图如图3 所示,并将其定义为拓扑1。

由于全桥子模块具备输出负电平的能力,因此 当全桥子模块与半桥子模块以一定的比例混合构成 MMC时也具备直流故障穿越能力,即 MMC 的 6 个 桥臂均由全桥子模块与半桥子模块以一定的比例混 合构成,本文将此种结构定义为对称型结构,同时提



Fig.2 Topologies of VSC sub-module

	表 1	4 种方式的优缺点比较				
Table 1	Merits and	demerits	comparison	among	four	modes

		Tuble I I	ionio una domon	to companio	in annoing tou	mouco		
方式	成本	损耗	能否清除直流 线路故障	故障清除 速度	开断能力	换流器 是否闭锁	适用电压 功率等级	潮流方向
a	1	1	能	慢	高	闭锁	低	双向
b	1.15~1.3	$1.05 \sim 1.15$	能	快	低	不闭锁	中	双向
с	1.3~1.4	1.3~1.45	能	快	低	不闭锁	高	双向
d	1.01~1.1	1.01~1.1	能	快	高	不闭锁	高	单向



图 3 基于全桥子模块的混合直流输电系统拓扑示意图 Fig.3 Topology schematic diagram of hybrid-HVDC system based on full-bridge sub-module

出 2 种非对称型结构。基于对称型结构的混合直流 输电拓扑示意图,如图 4 所示,并将其定义为拓扑 2。





基于子模块混合的非对称型结构的 MMC 具有 2种类型。类型 I 为 MMC 的 6 个桥臂中 3 个上桥 臂均采用全桥子模块,3 个下桥臂均采用半桥子模 块,如图 5 所示,并将其定义为拓扑 3。类型 II 为 MMC 的 6 个桥臂中 3 个上桥臂均采用半桥子模块, 3 个下桥臂均采用全桥子模块,如图 6 所示,并将其 定义为拓扑 4。

综上,基于具有直流故障穿越能力 VSC 的方 式,工程中可有 2 种类型 4 种拓扑结构适用于将常 规直流改造为混合直流输电系统。而基于电流源型 换流器与 VSC 组合的方式,工程中有 2 种拓扑结构 适用于将常规直流改造为混合直流输电系统,其中 一种为如图 7 所示的基于阻断二极管+HB-MMC 的 混合直流输电系统,并将其定义为拓扑 5,另一种为 如图 8 所示的基于晶闸管阀+HB-MMC 的混合直流 输电系统,并将其定义为拓扑 6。故适用于将常规 直流改造为混合直流输电系统的主回路拓扑共有 6 种可行的结构,下面将从技术性和经济性两方面对 这 6 种拓扑结构进行对比分析。

常规直流改造为混合直流输电系统后仍然需要 适应常规直流的两大特性<sup>[12]</sup>:电流裕度控制、降压 运行。由于混合直流输电系统整流侧仍然采用 LCC,而LCC产生的直流电压与所连交流系统的电 压成正比,在所连交流系统发生故障时可能导致 LCC-HVDC换流站的直流电压急剧下降,虽然可以



图 5 基于非对称 I 型 MMC 拓扑示意图 Fig.5 Topology schematic diagram of MMC based on asymmetrical type I



Fig.6 Topology schematic diagram of MMC based on asymmetrical type II



190



system with blocking diode





通过减小触发角  $\alpha$  来提升直流电压,但 LCC 在实际运行中存在最小触发角限制,一般为 5°。且 HB-MMC 在实际运行中存在最小直流电压限制,一般为 额定直流电压的 80% 左右。因此,在实际运行中可 能发生 LCC-HVDC 换流站的直流电压比 VSC-HVDC 换流站的直流电压低,从而导致直流系统无稳定运 行工作点。为了避免系统直流电压崩溃,需要采取 如附录中图 A1 所示的  $U_d$ - $I_d$  外特性来维持直流 电流。

由于全桥子模块能够输出负电平,具备四象限运行能力,能够控制直流电压从 $U_d$ 至- $U_d$ ,因而在LCC侧发生交流故障时能够接管系统的直流电流控制,维持直流电流的传输。拓扑1具备此性能,而当全桥子模块与半桥子模块比例达到1:1或以上时, 拓扑2—4均具备此性能。对于拓扑5而言,由于采用阻断二极管+HB-MMC结构,控制直流电压能力较弱。理论分析及大量仿真表明:当LCC侧发生交流故障引起直流电压低于0.5 p.u.时,直流电流将断流。而拓扑6则因为有晶闸管阀的直流电压控制作用,性能较拓扑5有较大提高,但当LCC侧发生交流故障引起直流电压低于0.3 p.u.时,直流电流 次为拓扑2、拓扑3、拓扑4、拓扑6,拓扑5最差。

对于降压运行这一重要特性,常规直流输电工 程均具备降压至 0.7 p.u. 运行的能力,这是为了当 直流架空线路由于各种原因而导致绝缘水平下降 时仍能正常输送功率,不致于给两端交流系统带来 较大冲击,影响系统稳定。MMC 的降压运行一般 受其最大可运行调制比的限制,目前主要有以下3 种方式来实现 MMC 的降压运行:调节调制比,调 整联结变压器档位,改变调制方式。由于全桥子模 块可以输出负电平,在不限制模块数的情况下,理 论上 FB-MMC 的调制比是无限的,因此 FB-MMC 具有优越的降压能力,即拓扑1具备大幅降压能 力。当全桥子模块与半桥子模块的比例达到一定 4具备一定的降压能力。拓扑5和拓扑6由于采 用半桥子模块,其只能输出正电平和零电平,因此 其降压能力受调制比、联结变压器档位和调制方式 的限制,其只在一定条件下具备一定的降压能力。 拓扑6由于串有可大幅调整直流电压的晶闸管阀, 因此其降压能力优于串有二极管阀的拓扑5。综 上,拓扑1在降压运行性能方面最优,拓扑5最差, 当全桥子模块与半桥子模块的比例为1:1时,拓扑 2—4 和 6 在降压运行性能方面基本一致。

表2对本文所述的6种拓扑结构进行了全面对 比(表中成本、损耗为标幺值),从表中可以看到拓 扑1-4的技术性较好,其中拓扑1即基于全桥子模 块结构的混合直流输电系统具有最优的技术性能。 而拓扑5和拓扑6具有较好的经济性,其中拓扑6 的经济性最好,然而拓扑5和拓扑6只适用于功率 单向传输的场合。需要特别指出的是,对于由全桥 子模块与半桥子模块以一定的比例混合构成的 MMC,即本文中的拓扑 2-4,这 3 种拓扑在技术性 和经济性方面基本一致,唯一的区别是混合子模块 的均压控制问题[21]。由于全桥子模块在桥臂电流 双方向上均能充电,而半桥子模块只能在桥臂电流 单方向上充电,同时实际中半桥和全桥子模块损耗 并不一致,因此当两者混合运用在同一桥臂中时,需 要额外增加相关协调控制器以实现子模块的均压, 而在拓扑3和拓扑4这2种非对称型结构中,由于 半桥和全桥子模块分别位于上桥臂和下桥臂,并不 存在此问题,因此拓扑3和拓扑4的性能优于拓 扑2。

# 4 仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 软件中搭建了 LCC-MMC 混 合直流输电系统仿真模型,以验证相关分析的正确 性。仿真系统的详细参数如下:系统额定直流电压  $U_{dN}$  = 500 kV,额定直流电流  $I_{dN}$  = 3 000 A;LCC 侧交 表 2 6 种拓扑的优缺点比较

	Table 2         Merits and demerits comparison among six topologies								
+7-+1	武士	损耗	能否潮流	能否降压	能否清除	LCC 站	VSC 站	子模块均压	控制
和扑	1111 风平		反转	运行	直流线路故障	交流故障	交流故障	难易	灵活度
1	1.3~1.4	1.3~1.45	能	能	能	可穿越故障	无换相失败	易	高
2	1.15~1.2	1.15~1.25	有条件的能	能	能	可穿越故障	无换相失败	难	较高
3 4	1.15~1.2	1.15~1.25	有条件的能	能	能	可穿越故障	无换相失败	易	较高
5	1	1	不能	有条件的能	能	功率可能中断	无换相失败	易	一般
6	0.95~1	0.85~0.9	不能	有条件的能	能	功率可能中断	部分换相失败	易	较高

流系统额定电压  $U_{acl} = 525 \text{ kV}$ ,阀侧额定电压  $U_{vl} = 208.6 \text{ kV}$ ,联结变压器变比为 525 kV/208.6 kV,变压器短路电压百分数  $u_{kl} = 15\%$ ,平波电感为 150 mH; VSC 侧交流系统额定电压  $U_{acl} = 525 \text{ kV}$ ,阀侧额定电压  $U_{vl} = 270 \text{ kV}$ ,联结变压器变比为 525 kV/270 kV,变压器短路电压百分数  $u_{k2} = 12\%$ ,直流电感为 50 mH,桥臂电感为 100 mH,子模块电容 C = 10 mF,子模块额定电压  $U_c = 1.655 \text{ kV}$ ,桥臂模块总数为 302 个,若为半桥子模块与全桥子模块混合则比例为 1:1, IGBT/二极管导通电阻为 0.001  $\Omega_o$ 

针对拓扑 5(基于阻断二极管+HB-MMC 的混合 直流输电系统)、拓扑 1(基于全桥子模块的混合直 流输电系统)和拓扑 3(基于混合子模块的非对称型 混合直流输电系统)3种拓扑结构,仿真验证了整流 侧 LCC-HVDC 换流站发生交流故障时各拓扑结构 的故障穿越能力,如附录中图 A2—A7 所示。图中, LCC-HVDC 换流站 $U_{AC1}$ 、 $U_{AC2}$ 、 $U_{AC3}$ 为网侧三相交流 相电压, $U_{ACRMS}$ 为网侧线电压有效值, $I_{VY1}$ 、 $I_{VY2}$ 、 $I_{VY3}$ 为 Y 桥 阀侧电流, $I_{VD1}$ 、 $I_{VD2}$ 、 $I_{VD3}$ 为 D 桥 阀侧电流,  $U_{DL_LCC}$ 为 LCC-HVDC 换流站直流电压, $U_{DL_VSC}$ 为 VSC-HVDC 换流站直流电压, $I_{0.1}$ 为直流电流, $I_{0.REF}$ 为直流电流参考值;VSC-HVDC 换流站 $U_s$  为网侧三 相交流相电压, $I_s$ 为网侧三相交流相电流, $U_v$  为阀侧 三相交流相电压, $I_v$ 为阀侧三相交流相电流, $U_v$  为阀侧

由附录中图 A2、图 A3 可见,当 LCC-HVDC 换 流站发生交流两相短路接地故障时,采用拓扑 5 直 流电流出现了断流。而相同故障下,采用拓扑 3 和 拓扑 1 仍然可以传输一定的功率,如附录中图 A4— A7 所示。故障清除后,3 种拓扑结构均可以快速地 恢复到稳态。

### 5 结论

a. 分析了适用于混合直流输电系统的主接线方式:对称单极接线和双极接线。对比分析了 2 种接线方式的优缺点,指出了双极接线是常规直流改造为混合直流最适合的接线方式。

b. 针对柔性直流架空线路故障隔离困难的问题,分析总结了4种可行的处理直流架空线路故障的方法,对比分析了每种方法的优缺点及适用场景,

指出了采用具有直流故障穿越能力的 VSC 及采用 电流源型换流器与 VSC 组合的 2 种方式,适用于常 规直流改造为混合直流输电系统。

c. 总结分析了工程中可行的 4 种适合于常规直 流改造为混合直流的拓扑结构,并提出了 2 种子模 块混合非对称型混合直流输电拓扑结构,从技术性 和经济性两方面对这 6 种拓扑结构进行了对比分 析,指出了每种拓扑结构的适用场合,其中基于晶闸 管阀+HB-MMC 的混合直流输电拓扑经济性最优, 基于全桥子模块的混合直流输电拓扑技术性最优。 给未来常规直流改造为混合直流在主电路拓扑选择 方面提供了借鉴。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

[1]梁旭明,张平,常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J].
 电网技术,2012,36(4):1-9.
 LIANG Xuming,ZHANG Ping,CHANG Yong. Recent advances in

high-voltage direct-current power transmission and its developing potential [J]. Power System Technology, 2012, 36(4):1-9.

- [2] 徐政,唐庚,黄弘扬,等. 消解多直流馈入问题的两种新技术
   [J].南方电网技术,2013,7(1):6-14.
   XU Zheng,TANG Geng,HUANG Hongyang, et al. Two new technology for eliminating the problem with multiple HVDC infeeds[J].
   Southern Power System Technology,2013,7(1):6-14.
- [3]杨鹏,吴娅妮,马士聪,等. ±1 100 kV 特高压直流输电工程直流 线路故障重启动过程非故障极换相失败研究[J]. 电力自动化 设备,2016,36(4):14-18.
  YANG Peng, WU Yani, MA Shicong, et al. Analysis of commutation failure of healthy pole during restart of faulty line for ±1 100 kV

UHVDC project [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4):14-18.

- [4]林凌雪,张尧,钟庆,等. 多馈入直流输电系统中换相失败研究 综述[J].电网技术,2006,30(17):40-46.
   LIN Lingxue,ZHANG Yao,ZHONG Qing, et al. A survey on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems[J].
   Power System Technology,2006,30(17):40-46.
- [5]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 VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15):3-14.
- [6]马为民,吴方劫,杨一鸣,等.柔性直流输电技术的现状及应用 前景分析[J].高电压技术,2014,40(8):2429-2439.

乙齿地灯状及甘柱树

MA Weimin, WU Fangjie, YANG Yiming, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8); 2429-2439.

[7] ZHAO Z. HVDC application of GTO voltage source inverters [D]. Toronto, Canada: University of Toronto, 1992.

192

- [8] MARQUARDT R, LESNICAR A. New concept for high voltage modular multilevel converter [C] // Proceedings of the 34th IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: IEEE, 2004:3831-3835.
- [9]黄伟煌,饶宏,黄莹,等.一种基于常规直流输电系统的混合直流改造方案[J].中国电机工程学报,2017,37(10):2861-2868.
   HUANG Weihuang, RAO Hong, HUANG Ying, et al. A novel refurbishment scheme for reforming the existing LCC-HVDC to hybrid HVDC[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(10):2861-2868.
- [10] 赵成勇,郭春义,刘文静. 混合直流输电系统[M]. 北京:科学出版社,2014:5-30.
- [11] 冯明,李兴源,李宽. 混合直流输电系统综述[J]. 现代电力, 2015,32(2):1-8.
  FENG Ming,LI Xingyuan,LI Kuan. A review on hybrid HVDC system[J]. Modern Electric Power,2015,32(2):1-8.
- [12] 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.
  WANG Yongping,ZHAO Wenqiang,YANG Jianming, et al. Hybrid high-voltage direct current transmission technology and its development analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41
  (7):156-167.
- [13] 陈欢,王振,杨治中,等.并联混合直流输电系统中传统直流和 柔性直流暂态无功协调控制策略研究[J].电网技术,2017,41
   (6):1719-1725.

CHEN Huan, WANG Zhen, YANG Zhizhong, et al. Coordinated reactive power control approach for LCC-HVDC and VSC-HVDC in hybrid parallel HVDC system[J]. Power System Technology, 2017, 41(6):1719-1725.

- [14] 谢晔源,曹冬明,李继红,等. 一种实现柔直系统快速恢复的自 取能故障阻尼器[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):142-147.
   XIE Yeyuan, CAO Dongming, LI Jihong, et al. Self-powered fault damper for realizing fast recovery of VSC-HVDC system [J].
   Electric Power Automation Equipment,2017,37(7):142-147.
- [15] 阙波,李继红,汪楠楠,等. 基于桥臂阻尼的柔性直流故障快速恢复方案[J]. 电力系统自动化,2016,40(24):85-91.
   QUE Bo,LI Jihong, WANG Nannan, et al. Arm damping based quick recovery scheme for flexible HVDC fault [J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(24):85-91.
- [16] HAFNER J, JACOBSON B. Proactive hybrid HVDC breakers-a key Innovation for reliable HVDC grids[C]//CIGRE 2011 Bologna Symposium. Bologna, Italy:[s.n.],2011:264.
- [17] 药韬,温家良,李金元,等. 基于 IGBT 串联技术的混合式高压 直流断路器方案[J]. 电网技术,2015,39(9):2484-2489.
  YAO Tao, WEN Jialiang, LI Jinyuan, et al. A hybrid high voltage DC circuit breaker design plan with series-connected IGBTs[J].
  Power System Technology,2015,39(9):2484-2489.
- [18] 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.
- [19] 阳莉汶,江伟,王渝红,等.具有直流故障阻断能力的电容嵌位

子模块拓扑及其特性[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 172-177.

YANG Liwen, JIANG Wei, WANG Yuhong, et al. Capacitor-embedded submodule topology with DC fault blocking capability and its characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37 (12):172-177.

- [20] 李仲青,何佳伟,李永丽,等. 具有交流源完全阻断能力的混合 式 MMC 拓扑[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):96-101.
  LI Zhongqing, HE Jiawei, LI Yongli, et al. Hybrid MMC topology with complete AC-side source blocking capability [J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(3):96-101.
- [21] 和敬涵,黄威博,李海英,等. FBMMC 直流故障穿越机理及故障 清除策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):1-7.
  HE Jinghan, HUANG Weibo, LI Haiying, et al. FBMMC DC fault ride-through mechanism and fault clearing strategy [J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(10):1-7.
- [22] GUO C,ZHAO C,PENG M, et al. Investigation of a hybrid HVDC system with DC fault ride-through and commutation failure mitigation capability[J]. Journal of Power Electronics, 2015, 5 (15): 1367-1379.
- [23] 徐政,王世佳,李宁璨,等.适用于远距离大容量架空线路的 LCC-MMC 串联混合型直流输电系统[J].电网技术,2016,40 (1):55-63.

XU Zheng, WANG Shijia, LI Ningcan, et al. A LCC and MMC series hybrid HVDC topology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Power System Technology, 2016, 40(1):55-63.

[24] 孔明,汤广福,贺之渊. 子模块混合型 MMC-HVDC 直流故障穿 越控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(30):5343-5351.
KONG Ming,TANG Guangfu,HE Zhiyuan. A DC fault ride-through strategy for cell-hybrid modular multilevel converter based HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(30): 5343-5351.

#### 作者简介:



赵文强(1985—),男,湖北鄂州人,工 程师,硕士,通信作者,主要研究方向为高压 直流输电和柔性直流输电及大功率电力电子 技术在电力系统中的运用(E-mail:zhoawq@ 163.com);

赵文强

宣佳卓(1986—),男,浙江诸暨人,工 程师,博士,主要研究方向为柔性直流输电

技术;

陆 翌(1979—),男,浙江嘉兴人,高级工程师,博士,主 要研究方向为高压直流输电和柔性直流输电及大功率电力 电子技术在电力系统中的运用;

李继红(1964—),男,浙江杭州人,教授级高级工程师, 硕士,主要研究方向为电网调度运行、电力系统运行与分析;

王永平(1978—),男,江苏镇江人,高级工程师,硕士,主 要研究方向为高压直流输电技术;

汪楠楠(1986—),男,江苏扬州人,工程师,硕士,主要研 究方向为柔性直流输电技术;

卢 宇(1979—),男,湖北荆州人,高级工程师,硕士,主 要研究方向为高压直流输电和柔性直流输电技术。

# Research on circuit topology of hybrid HVDC system suitable for refurbishing existing LCC-HVDC

ZHAO Wenqiang<sup>1</sup>, XUAN Jiazhuo<sup>2</sup>, LU Yi<sup>2</sup>, LI Jihong<sup>3</sup>, WANG Yongping<sup>1</sup>, WANG Nannan<sup>1</sup>, LU Yu<sup>1</sup>

(1. Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang

Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China) **Abstract**: The advantages and disadvantages of two main connection schemes designed for hybrid HVDC (High Voltage Direct Current) system are analyzed and compared. According to the features of refurbishing the existing LCC-HVDC (Line Commutated Converter based HVDC) to hybrid HVDC, it is concluded that the bipolar connection scheme is more suitable. Considering the problem of the overhead line fault isolation in VSC-HVDC (Voltage Source Converter based HVDC) system, four feasible methods are analyzed and compared, the applicable occasions, merits and demerits of each method are analyzed, and the suitable methods for refurbishing LCC-HVDC to hybrid HVDC are pointed out. Combined with the above mentioned overhead line fault isolation method, four feasible topologies suitable for refurbishing LCC-HVDC to hybrid-HVDC are summarized, and two topologies of asymmetrical cell-hybrid MMC (Modular Multilevel Converter) are proposed. The applicable occasions of each topology are summarized by comparison in terms of technology and economy.

.....

Key words: VSC-HVDC; modular multilevel converter; hybrid HVDC power transmission; circuit topology

(上接第 173 页 continued from page 173)

WANG Han, ZHANG Jianwen, CAI Xu. An improved control method of the dynamic ability for PWM rectifier [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(Supplement 1): 194-202.

[19] 汪万伟,尹华杰,管霖. 双闭环矢量控制的电压型 PWM 整流器 参数整定[J]. 电工技术学报,2010,25(2):67-72.
WANG Wanwei, YIN Huajie, GUAN Lin. Parameter setting for double closed-Loop vector control of voltage source PWM rectifier [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(2):67-72.

[20] 德赖斯. 线性控制系统工程[M]. 金爱娟,李少龙,李航天,译. 北京:清华大学出版社,2005:114-116.

#### 作者简介:



辛 征(1979—),男,山东济南人,讲师, 博士,通信作者,主要研究方向为新能源发电及 其电子电子技术(E-mail:xinzheng9309@163. com);

魏 莉(1979—),女,山东济南人,讲 师,硕士,主要研究方向为信号处理与检测; 施啸寒(1986—),男,山东济南人,副

教授,博士,主要研究方向为储能在电力系统中的应用。

#### Design of double closed-loops control system of VSC used in SMES device

XIN Zheng<sup>1</sup>, WEI Li<sup>1</sup>, SHI Xiaohan<sup>2</sup>

(1. School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education,

Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract**: The double closed-loops control system based on PI controller is simple and reliable, but has the problems such as unsatisfactory control effect of the theoretical PI parameters and lack of systematic methods for further parameter adjustment. In order to solve these problems, the VSC(Voltage Source Converter) often used in the SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) devices is taken as the object to study the design method of double closed-loops control system of VSC. Firstly, the mathematical model and the control system structure of VSC in SMES system are given, and the formulas of PI parameters are induced based on the two-order best adjustment methodology. Secondly, the impact of PI parameters on the dynamic performance of each control loop is analyzed with the transfer function and root locus as the tools, and then the systematic steps of PI parameters adjustment are summarized. Finally, the case simulation verifies the rationality of theoretical analysis and the effectiveness of the parameters adjustment steps.

Key words: SMES; VSC; double closed-loops; power control; parameter adjustment of PI controller; root locus analysis



图 A1 混合直流 Ud-Id 外特性 Fig.A1 Ud-Id characteristic of hybrid-HVDC system



图 A2 拓扑五 LCC 站交流两相接地故障时 LCC 站波形 Fig. A2 Simulation results of LCC rectifier for ac faults at



8.00 图 A3 拓扑五 LCC 站交流两相接地故障时 VSC 站波形

7.75

8.25 8.50

Fig. A3 Simulation results of VSC inverter for ac faults at rectifier end based on topology five



图 A4 拓扑三 LCC 站交流两相接地故障时 LCC 站波形 Fig. A4 Simulation results of LCC rectifier for ac faults at rectifier end based on topology three







图 A6 拓扑一 LCC 站交流两相接地故障时 LCC 站波形 Fig. A6 Simulation results of LCC rectifier for ac faults at rectifier end based on topology one



图 A7 拓扑— LCC 站交流两相接地故障时 VSC 站波形 Fig. A7 Simulation results of VSC inverter for ac faults at rectifier end based on topology one