

一种不依赖直流断路器的直流电网架构

刘航,彭茂兰,王越杨,张楠,严喜林

(超高压输电公司 检修试验中心,广东 广州 510663)

摘要:提出一种不依赖直流断路器的直流电网架构和相应的控制保护策略。根据电压等级和端口特征,将直流电网划分为若干子系统,通过在子系统间的连接线上串入故障隔离设备,即可不依赖直流断路器,实现直流故障的就地处理,故障子系统的隔离及重启过程不影响健全子系统正常的功率传输。相应的功率调节策略和站间通信分层设计方案,可以有效降低定电压控制换流站的过负荷风险及站间通信系统的复杂度。PSCAD/EMTDC环境下的仿真结果验证了所提出的直流电网和对应控制保护策略的有效性。

关键词:直流断路器;直流电网;多端直流输电;直流故障;混联模块化多电平换流器

中图分类号:TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202006020

0 引言

随着直流输电技术,特别是柔性直流输电(VSC-HVDC)技术的快速发展^[1],工程界已经开始积极尝试拓展端对端的直流能量输送形式,将多端直流和直流电网技术引入传统电网,以应对深刻变化的能源格局和快速增长的可再生能源并网需求^[2-4]。

相较于交流电网,直流电网在应对直流故障时面临更多挑战:一方面取决于直流电网的“低阻尼”特性,直流电网发生故障时,故障电流发展更快,故障范围波及更广^[5-6],需要在数毫秒内隔离故障线路或故障换流站^[7];另一方面取决于半桥型模块化多电平换流器(HB-MMC)的拓扑特性,半桥型子模块不能通过闭锁抑制交流侧故障电流的馈入,需要引入直流断路器或具有故障箝位能力的换流器以切断故障电流。

目前直流断路器的应用尚在探索阶段,其设备特性,无论是经济性方面^[7]还是技术的成熟度方面,离全面化的工程应用尚有一段距离,这也是目前基于直流断路器的直流电网架构^[8]在落地时遇到的主要困难。而另一种并行方案,虽然可以通过具有故障箝位能力的换流器与快速机械开关HSS(High Speed Switch)的配合^[9-11],切除故障直流线路或故障换流器,但在故障处理期间,需要网架上并联的所有换流站配合移相、闭锁或控零压,等效于全面扩大了故障范围,整个网架的功率传输中断,因此该设计方案仅适用于容量相对较小的多端直流输电领域,很难将其直接移植到直流电网层面^[11]。

基于上述背景,本文提出了一种不依赖直流断路器的直流电网架构。该直流电网架构由若干子网架构成,单个子网架又可视为一个由具备故障箝位能力的换流器构成的多端直流子系统。通过在子系统间的连接线及相关线路上串入故障隔离设备,即可不依赖直流断路器,实现直流故障的就地处理。

直流电网的故障处理期间,故障隔离设备相继动作,将健全子系统与故障子系统隔离,从而保证故障子系统的隔离及重启过程不影响其他健全子系统的功率传输。该架构采用分区保护的设计思路,拓宽了“故障箝位换流器+HSS”方案的应用场景,不依赖直流断路器的开断,快速灵活、有选择性地处理直流电网层面的线路故障及换流器故障。“区域化”的特征,降低了直流电网故障定位的精度需求,同时简化了直流控制保护系统和站间通信系统的设计复杂度;更重要的是在直流电网层面,将对大量直流断路器的需求弱化为对HSS和特定架空线路上故障隔离设备的需求,在投资成本上具有一定优势。

1 直流电网架构及相关设备

1.1 不依赖直流断路器的直流电网架构

本文提出的不依赖直流断路器的直流电网架构,可通过图1进行说明。根据电压等级及端口特征将图1中的9端直流电网划分为3个多端直流子系统,其中子系统1的电压等级为 ± 250 kV,子系统2、3的电压等级均为 ± 200 kV,子系统依靠连接线OHL₁—OHL₃相互连接。特别地,OHL₁上还配置有DC/DC变换器,以实现子系统1、2间不同直流电压等级的变换。子系统内部,水电站、风电场等可再生能源基地通过常规直流输电(LCC)并入直流电网,各区域负荷中心的等值交流电网通过混联模块化多电平换流器(MMC)并入直流电网,直流母线间通过HSS及直流架空线OHL(Over Head Line)互联。直流电网中,为了在直流故障期间将健全子系统与故障子系统隔离,子系统间连接线OHL₁—OHL₃除配置HSS外,还应在其上及相关线路上串入故障隔离设备,以保证该直流电网架构具备直流故障处理的选择性,即特定子系统的直流故障处理过程,不影响其他健全子系统的正常功率传输。下文将对图1中涉及器件和设备的具体结构补充说明。

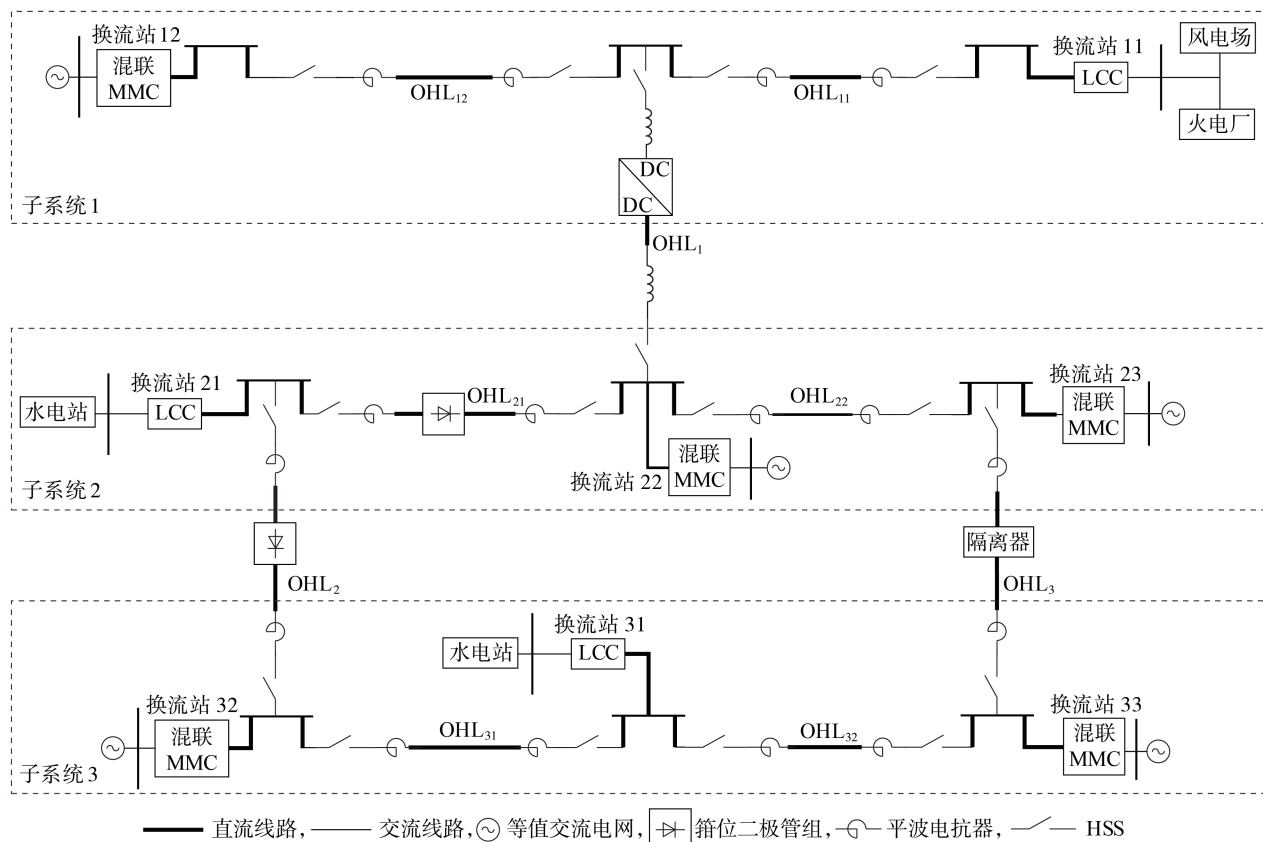


图1 不依赖直流断路器的直流电网

Fig.1 DC Grid without application of DC breaker

1.2 子系统设备

不依赖直流断路器的直流电网中主要包括常规设备(LCC、OHL、HSS)、混联MMC及DC/DC变换器。各子系统中,由于流出可再生能源基地的潮流方向单一,同时整流站没有换相失败风险,用LCC将此类端口并入直流电网的优越性十分明显,不仅投资成本及运行损耗较低,还能有效地提升系统传输容量。OHL作为电力通道连接各直流母线构成直流电网网架,HSS则通过与故障子系统配合,在去游离完成后,迅速切除故障线路或故障换流站。

与此同时,为了摆脱对直流断路器的依赖,各换流站需具备故障箝位功能,以防止直流故障期间,交流电网持续向故障点馈入短路电流。在构建满足上述功能的换流器时,为了兼顾技术性能与投资成本,可将基本单元模块混联构成混联MMC,如图2所示。混联MMC的直流故障穿越机理以及混联比例的整定原则参见文献[12-14],本文不再赘述。

此外为了连接处于不同直流电压等级的子系统1、2,本文基于文献[15]设计了一种新型DC/DC变换器,其拓扑结构见图3。图中, U_{d1} 、 L_0 分别为一次侧额定电压、电感; U_{d2} 、 I_{d2} 、 L_2 分别为二次侧额定电压、额定电流、电感; N 为桥臂中子模块数。DC/DC变换器主要由A相子模块 SM_A 、B相子模块 SM_B 、二

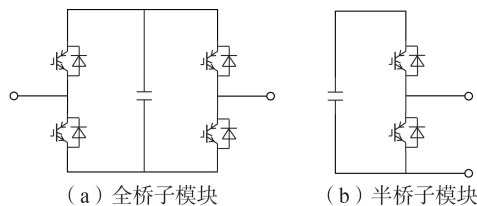


图2 混联MMC基本单元模块

Fig.2 Sub-modules of hybrid MMC

极管及箝位二极管组构成,其工作原理不再赘述。该新型DC/DC变换器,无需交流环节的介入,可直接实现两侧直流电压等级的变换,并且能通过闭锁实现两侧直流故障的隔离,相较于传统基于MMC的DC/DC变换器,显著减少了直流能量变换所需功率模块的数量并降低了其成本。

1.3 故障隔离设备

图1中展示了3类子系统间连接方式,分别对应连接线 OHL_1 — OHL_3 。其中, OHL_1 用以连接电压等级不同的2个子系统; OHL_2 用以连接电压等级相同且连接线两端包含可再生能源基地的2个子系统; OHL_3 用以连接电压等级相同且连接线两端均为区域负荷中心的2个子系统。由于图3所示的新型DC/DC变换器兼具故障隔离功能,因此 OHL_1 无需额外配置故障隔离设备;而 OHL_2 、 OHL_3 则需要分别串入箝位二

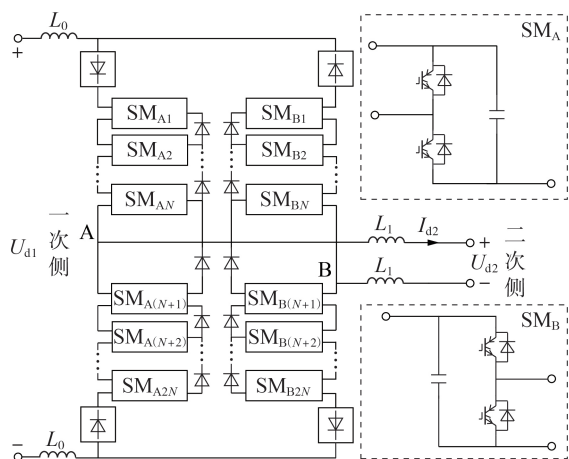


图3 新型DC/DC变换器拓扑

Fig.3 Topology of novel DC/DC converter

极管组和隔离器以实现直流故障期间的相互隔离。

箝位二极管组由一系列电力二极管串联而成,由于流出能源基地的潮流方向单一,该设备能够在不影响子系统间正常功率传输的前提下,利用二极管的箝位能力自发隔离故障子系统。

OHL₃两端均为区域负荷中心,为响应两侧子系统间潮流灵活转移的需求,不能简单地在连接线上串入箝位二极管组,相应地,需要在其上串入隔离器。隔离器由图2(a)所示全桥子模块串联而成。稳态时,隔离器作为潮流控制器运行,控制子系统间的功率流动;两侧子系统检测到直流故障时,隔离器中全桥子模块迅速闭锁,将故障子系统隔离。

通过配置上述子系统设备,可以灵活构建各类子系统,而后根据实际需求利用连接线及对应的故障隔离设备使不同的子系统相互连接,即可构成不依赖直流断路器的直流电网。相较于基于直流断路器的直流电网架构,该架构极大弱化了直流故障清除对线路上一级设备的需求。以图1所示的直流电网为例,若采用直流断路器方案,则正负极母线上共需配置36台直流断路器,对应地,本文所述方案需配置2组隔离器、4组箝位二极管组及36个HSS。现阶段,相同电压等级的直流断路器价格显著高于HSS,而隔离器及箝位二极管的需求有限,因此可以认为,不依赖直流断路器的直流电网架构在构建直流电网时具备相当的成本优势。

2 直流电网控制保护策略

不依赖直流断路器的直流电网,在拓扑上可以划分为若干个子网架,单个子网架可视为一个多端直流子系统。因此该直流电网,在控制保护策略方面,可以很大程度上继承现有多端直流系统的研究成果,但在具体实施细节方面需针对性地重新设计,下文将展开论述。

2.1 稳态控制策略

上述直流电网进入稳态后,宜采用经典的主从控制方式对电网直流电压及潮流分布进行控制^[16]。具体操作为首先在各子系统内根据混联MMC连接交流系统的强弱选取局部主控站,然后在各局部主控站中根据容量的大小选取全局主控站。稳态运行时,电网中LCC采用定直流电流控制,全局主控站采用定直流电压控制,其他混联MMC站采用定有功功率控制,DC/DC变换器两侧电压目标值按对应的电压等级整定。当全局主控站丧失或功率越限时,由相邻子系统的局部主控站接管直流电压控制功能。

2.2 功率调节策略

根据上述稳态控制策略易知,若不附加其他控制环节,直流电网上所有换流站的功率波动将全部由全局主控站承担。不依赖直流断路器的直流电网架构具有可拓展的特性,随着电网规模的扩大,依靠单站吞吐功率波动极易造成全局主控站过负荷或相关连接线过载。

为防止直流电网中全局主控站承担过大的功率调节压力,当直流电网因故障或计划发生功率变化时,若功率变化大于所设阈值,则将波动值 ΔP 按照所连交流系统的频率调节效应系数 λ_{ik} 分配至各换流站,即:

$$\begin{cases} \lambda_i = \sum_{k=2}^{N_i} \lambda_{ik} \\ \Delta P_i = \lambda_i \Delta P / \sum_{k=1}^{N_i} \lambda_k \\ \Delta P_{ik} = \lambda_{ik} \Delta P_i / \lambda_i \quad k \neq 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, N_i 为直流电网包含的子系统数目; N_i 为子系统*i*包含的换流站数目; λ_i 为子系统*i*各混联MMC换流站连接交流系统频率调节效应系数之和; ΔP_i 为子系统*i*需承担的功率调节额度; ΔP_{ik} 为子系统*i*内混联MMC换流站*ik*需承担的功率调节额度。为了保证可再生能源的输出,LCC不主动参与上述功率调节策略。

根据该调节策略,直流电网中,全局主控站作为定直流电压站为网架提供电压参考,并独立消纳阈值范围内的功率波动。当功率波动超过所设阈值时,根据所连交流系统的强弱分配至各换流站共同承担,极大降低了全局主控站频繁过负荷及相关连接线持续过载的风险。

2.3 站间通信系统

两端直流输电及多端直流输电系统设计的换流站数量有限,因此均采用站与站直接通信的方式构建站间通信系统,即各站间均通过多回光纤相互连接。而对于直流电网,随着换流站数量的增加,站与站间直接通信的链路需求将急剧增大。

不依赖直流断路器的直流电网可分两层规划站间通信系统。在子系统层面,站间相互通信;在直流电网层面,子系统间相互通信。对于包含 N_1 个子系统的直流电网,若每个子系统均包含3个换流站,则上述方案与采用站与站间直接通信方案,在通信链路需求方面的对比如式(2)所示。

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{3N_1 + C_{N_1}^2}{C_{3N_1}^2} = \frac{N_1 + 5}{9N_1 - 3} \quad (2)$$

其中, n_1 、 n_2 分别表征分层设计方案和对比方案的通信链路需求。当 N_1 较大,即直流电网拓展至一定规模时, $n_1/n_2 \approx 1/9$ 。因此,将规模较大的直流电网划分为若干子系统可以显著降低站间通信系统的复杂度。

2.4 直流故障定位及保护策略

不依赖直流断路器的直流电网采用分区保护的直流故障处理策略,直流故障期间,由故障子系统主导进行移相、闭锁等故障穿越操作。因此直流电网层面,故障定位的精度需求可以相应降低至子系统水平,故障识别定位算法只需快速鉴别故障子系统与健全子系统。

根据文献[17]提出基于直流电抗器电压的故障定位方法,可利用直流电网中各子系统间连接线上的直流电抗器,依据直流电抗器两端的电压差,在直流故障发生后,快速准确地识别故障子系统。

定位到故障子系统后,相应连接线上的故障隔离设备迅速动作,将故障子系统与健全子系统隔离。与此同时,故障子系统中LCC快速移相,混联MMC闭锁或采用其他故障穿越控制策略。去游离完成后,子系统层面根据具体的故障类型进行下一步操作。对于故障换流站,HSS将故障换流站切除,子系统剩余换流站重启,并随着故障隔离设备动作的解除重新并入直流电网;对于故障线路,子系统首先进行重启,重启成功,随着故障隔离设备动作的解除重新并入直流电网,重启失败则切除故障线路后并入。故障处理过程中,若全局主控站丧失,需释放局部主控站的电压控制功能,全局主控站重新并入,则需收回局部主控站的电压控制功能,以免造成电压波动和潮流震荡。

3 仿真实证

为了验证上述不依赖直流断路器直流电网的直流故障处理能力和相应控制保护策略的正确性,在PSCAD/EMTDC环境下搭建了图1所示的9端直流电网模型。仿真中选定换流站22为全局主控站,选定换流站12、换流站32为局部主控站,同时各子系统中混联MMC均采用闭锁的方式穿越直流故障。

3.1 稳态控制策略验证

按照主从控制模式启动直流电网,电网稳定运

行后3个子系统直流电压水平和子系统间功率传输的仿真波形如图4所示。

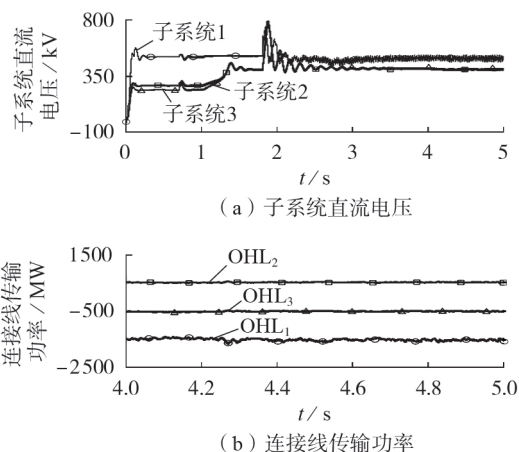


图4 所提直流电网稳态运行仿真波形图

Fig.4 Steady state waveforms of proposed DC grid

为了减小直流电网启动阶段的冲击,1.8 s前,模型内子系统2、子系统3协同启动,子系统1独立启动,其中子系统1由局部主控站,即换流站12控制直流电压。1.8 s时投入DC/DC变换器,换流站12随即转为定有功功率控制,此时子系统1的直流电压控制功能由DC/DC变换器接管。出于仿真速度的考虑,模型中DC/DC变换器单个桥臂仅配置10个子模块,所以子系统1的直流电压表现出一定的波动性。

进入稳态运行后,子系统1的正负极线压差约为500 kV(± 250 kV),子系统2、3的正负极线压差约为400 kV(± 200 kV),同时3条子系统间连接线能够稳定地输送有功功率,以流出子系统2的功率方向为正,OHL₁—OHL₃上流过的有功功率分别为-1500、500、-500 MW。基于多端直流的直流电网架构能够在主从控制策略下稳定运行。

3.2 有功功率调节

进入稳态运行后,修改换流站23电流定值,使其有功功率由550 MW降至300 MW,未采用功率调节策略时,全局主控站换流站22的功率及桥臂电流响应如图5所示。由图5可知,转移后的有功功率将全部由换流站22承担,相应地其传输功率由1300 MW增至1550 MW,桥臂电流也随之在暂态过程中升至4500 A,4500 V/3000 A型IGBT器件典型的I段过流定值为4700 A,因此当未采用功率调节策略时,图1所示的直流电网中全局主控站后续运行时过流(过负荷)的风险很高。

对应相同的功率波动,按照式(1)对直流电网中所辖各换流站的功率(电流定值)进行调节,换流站22的功率及桥臂电流响应见图6。仿真中为了便于

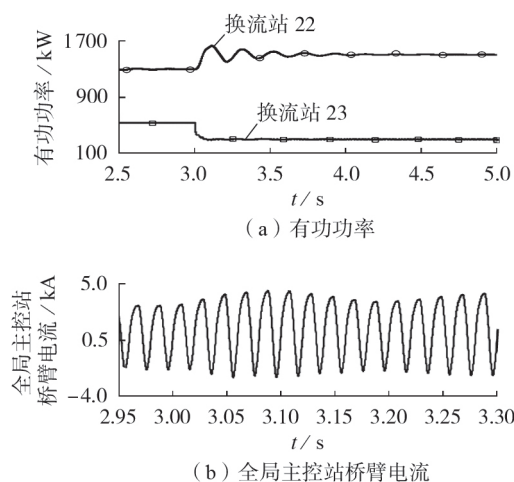


图5 未采用功率调节策略时换流站22的功率及桥臂电流
Fig.5 Active power and arm current of Converter 22 without proposed power regulation strategy

操作,假设网架中各交流电网频率调节效应系数相同,各站间通信延时均为10 ms,且此次功率波动超过了预设的功率阈值。由图6可知,基于本文提出的功率调节策略,功率波动将由直流电网中的各柔直站共同承担,换流站22的传输功率及桥臂电流增量得到了有效缓解,减小了全局主控站功率过负荷的风险。

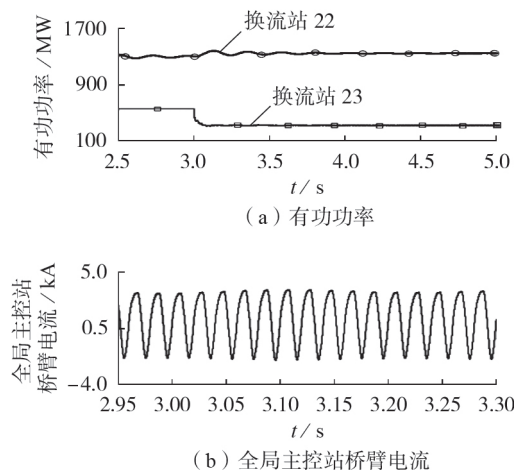


图6 功率调节策略下换流站22的有功功率及桥臂电流
Fig.6 Active power and arm current of Converter 22 with proposed power regulation strategy

3.3 故障子系统的隔离

直流电网中配置的故障隔离设备,用以在直流故障时隔离故障子系统。仿真中模拟了子系统2极间短路故障,相应的故障隔离过程如图7所示。由图7可知,3.995 s触发OHL₂₁极间短路故障,2 ms后故障隔离设备动作(DC/DC变换器、隔离器闭锁),相关子系统连接线上传输的功率随之降至0,避免了健全子系统向故障点馈入能量。4 s时子系统2中LCC移相,混联MMC闭锁,子系统维持零压以消除

故障电流,在此期间,子系统1、3的直流电压迅速恢复正常,可以在子系统内部进行正常的功率传输。

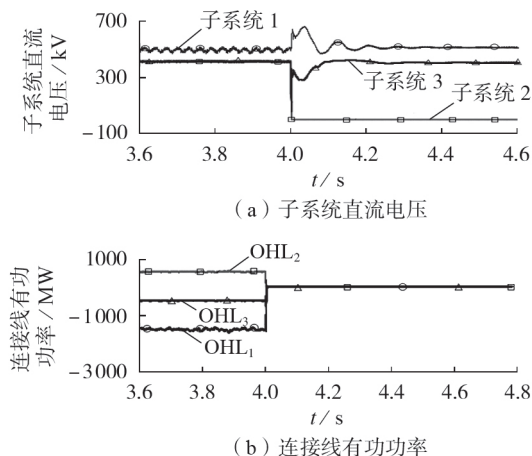


图7 子系统2故障隔离波形
Fig.7 Waveforms during isolation of Sub-system 2

值得一提的是,随着子系统2的隔离,直流主网架丧失全局主控,子系统1、3中的换流站12、换流站32随即接管定直流电压功能。由图7可知,换流站12接管直流电压控制后,子系统1的直流电压纹波相应减少。

子系统1的故障隔离过程与子系统2类似,通过闭锁DC/DC变换器,即可将子系统1从直流电网上隔离。子系统3的故障隔离过程则相对特殊,由于子系统3发生直流故障时,故障箝位二极管组不能有效隔离换流站21,因此子系统3的故障隔离,除闭锁隔离器外,还需要换流站21协同移相。

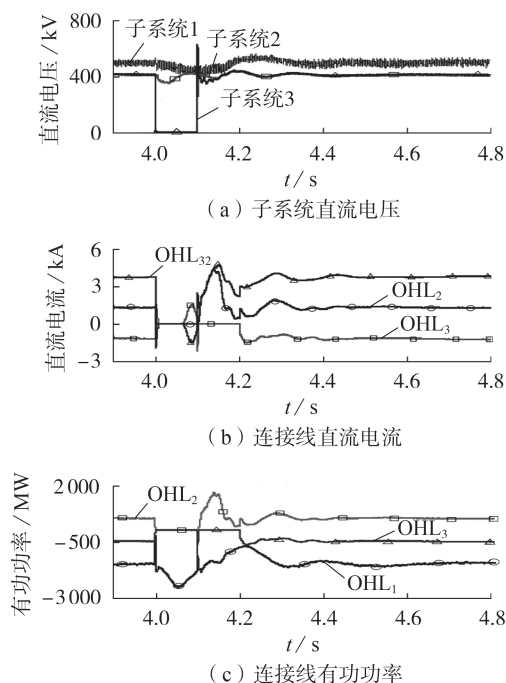
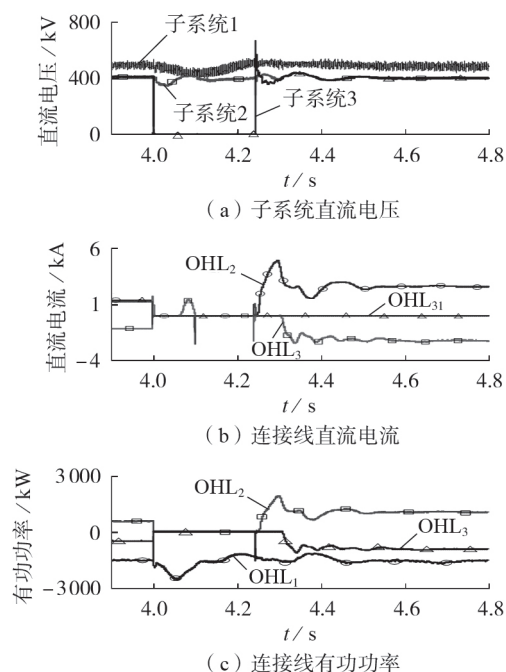
3.4 故障子系统的重启

故障子系统隔离后,子系统应根据具体的故障类型进行重启,将非故障设备重新并入直流电网,以提高直流电网中换流站和直流通道的可用率。

试验先后进行2次,分别在3.995 s触发OHL₃₁瞬时性和永久性极间短路,4 s时子系统3完成一系列故障隔离及移相、闭锁操作,后续的重启过程波形如图8、9所示。为了便于描述,试验仅进行了1次全压重启。

由图8可知,3.997 s时启动隔离器即换流站处于闭锁状态,4 s时子系统3中LCC与换流站21协同移相,混联MMC立即闭锁,故障电流随之减小。经过100 ms的去游离时间,子系统3与换流站21全压重启成功,随后隔离器解除动作,子系统3及换流站21接入直流电网,由于故障前后网架结构未发生变化,因此子系统3相关线路上的直流电流及有功功率恢复到故障前水平。

与图8不同,图9中4.1 s时故障子系统与换流站21全压重启不成功,子系统3与换流站21再次移相、闭锁,150 ms后,OHL₃₁两端的HSS拉开,将故障

图8 OHL₃₁瞬时性故障仿真波形图Fig.8 Waveforms of transient fault on OHL₃₁图9 OHL₃₁永久性故障波形Fig.9 Waveforms of permanent fault on OHL₃₁

线路隔离。随后子系统3与换流站21成功重启接入直流电网,由于网架结构发生改变,子系统3相关连接线上的直流电流及有功功率进入新的稳态水平。

仿真结果表明,本文提出的不依赖直流断路器的直流电网架构,能在主从控制的框架下稳定运行,同时能够不依赖直流断路器,对网架上的直流故障选择性处理,故障子系统直流故障穿越期间,健全子系统可以保持正常的功率传输。

4 结论

本文提出了一种不依赖直流断路器的直流电网架构,相较于基于直流断路器的直流电网,在技术性和经济性方面所呈现的创新性和优越性如下:

(1)该直流电网架构具备显著的“区域化”特征,利用该特征可以优化功率调节模式与站间通信系统设计,在较大规模的直流电网中,显著降低主控站过负荷风险及站间通信系统复杂度;

(2)采用分区保护的直流故障保护策略,故障穿越以子系统为基本操作单位,降低了直流故障定位的精度需求;

(3)通过在特定线路上配置故障隔离设备,即可快速、有选择性地处理各类直流故障,相较于基于直流断路器的直流电网,将每回架空线路上配置4台直流断路器的需求弱化为特定架空线路上配置故障隔离设备的需求,在成本上具有一定优势。

参考文献:

- [1] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C]// Power Tech Conference Proceedings. Bologna, Italy: IEEE, 2003: 1-6.
- [2] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用场景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.
- [3] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [4] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.
TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R&D application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.
- [5] 吴亚楠, 吕铮, 贺之渊, 等. 基于架空线的直流电网保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3726-3733.
WU Yanan, LÜ Zheng, HE Zhiyuan, et al. Study on the protection strategies of HVDC grid for overhead line application[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3726-3733.
- [6] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.
YAO Liangzhong, WU Jing, WANG Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020.
- [7] TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui, et al. Basic topology and key devices of the five-terminal DC grid[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(2): 22-35.
- [8] 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.
- [9] 王金健, 王志新. 一种具有限流能力的新型混合式高压直流断路器拓扑[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 143-149.
WANG Jinjian, WANG Zhixin. A novel hybrid high-voltage DC

- circuit breaker topology with current limiting capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 143-149.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 多端柔性直流系统直流故障保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4627-4636.
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. DC fault protection strategy for the flexible multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4627-4636.
- [13] 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.
- [14] 李少华, 王秀丽, 李泰, 等. 混合式MMC及其直流故障穿越策略优化[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1849-1858.
LI Shaohua, WANG Xiuli, LI Tai, et al. Optimal design for hybrid MMC and its DC fault ride-through strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1849-1858.
- [15] 刘航, 赵成勇, 周家培, 等. 具备自均压能力的模块化多电平换流器拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5707-5716.
LIU Hang, ZHAO Chengyong, ZHOU Jiawei, et al. Novel topology of modular multilevel converter with voltage self-balancing ability[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5707-5716.
- [16] 赵学深, 彭克, 张新慧, 等. 多端柔性直流配电系统主从控制模式下的稳定性与优化控制[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 14-20.
ZHAO Xueshen, PENG Ke, ZHANG Xinhui, et al. Stability and optimal control of multi-terminal flexible DC distribution system under master-slave control mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 14-20.
- [17] 周佳培, 赵成勇, 李承昱, 等. 基于直流电抗器电压的多端柔性直流电网边界保护方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 89-94.
ZHOU Jiawei, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. Boundary protection scheme for multi-terminal flexible DC grid based on voltage of DC reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 89-94.

作者简介:



刘航

刘航(1992—),男,河南许昌人,工程师,硕士,主要研究方向为高压直流输电控制与保护系统(E-mail: Berlinliu@foxmail.com);

彭茂兰(1991—),女,江西吉安人,工程师,硕士,主要研究方向为柔性直流输电工程设计与试验技术(E-mail: pml1081170912@163.com);

王越杨(1994—),男,云南曲靖人,工程师,主要研究方向为高压直流输电仿真与建模(E-mail: 316649462@qq.com)。

(编辑 王欣竹)

Design of DC power grid without application of DC breaker

LIU Hang, PENG Maolan, WANG Yueyang, ZHANG Nan, YAN Xilin

(Maintenance & Test Center, EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China)

Abstract: A DC power grid without application of DC breaker and its corresponding control and protection strategy are proposed. According to the voltage level and port characteristics, the DC power grid is divided into several sub-systems. By connecting the fault isolation equipment in series on the connecting line between the sub-systems, the DC fault can be handled locally without the help of DC breakers. The normal power transmission of perfect subsystem is not affected by the isolation and restart process of the fault sub-system. Relevant power regulation strategy and hierarchical design scheme of inter-station communication can effectively reduce the overload risk of constant voltage control converter station and the complexity of inter-station communication system. Based on PSCAD/EMTDC platform, the efficiency of the proposed DC grid and its corresponding control and protection strategy is validated by the simulative results.

Key words: DC breaker; DC power grid; multi-terminal DC transmission; DC fault; hybrid modular multilevel converter