

基于直流高速开关的换流站在线投退策略

黄如海¹, 邱德锋¹, 鲁江¹, 董云龙¹, 甘宗跃²

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司, 广东 广州 510663)

摘要:特高压多端直流工程中,采用直流高速开关(HSS)配合全/半桥混合模块换流阀的方式来实现直流故障清除和换流站在线投退是现有技术水平下的较佳选择,但HSS极弱的直流电流分断能力对控制保护设备提出了苛刻要求,且该方式下的换流站在线投退策略尚未见报道。基于HSS的电气特性和混合模块换流阀的能力,分析了多端直流系统中HSS的配置原则并设计了HSS典型电路;研究了基于HSS的换流站在线投退策略和多电压源换流器(VSC)换流站协同充电方案;为了保障系统和设备安全,提出了HSS的详细保护策略和动作结果。所提策略均已在昆柳龙混合直流工程中进行了应用,研究结果可为多端直流工程的单站投退方案提供借鉴和参考。

关键词:直流高速开关;在线投退;运行方式;基于电压源换流器的柔性直流输电;混合高压直流输电

中图分类号:TM 761;TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202203014

0 引言

近年来,直流输电技术以其线损小、输送距离远、输送容量大、无需同步运行、可以快速调节功率等巨大优势,在跨区域送电、各大电网互联、分布式能源接入、孤岛供电和大城市供电等领域得到了广泛的应用^[1-2],国内电网逐渐呈现出“强直弱交”的特性^[3]。当需要多个电源区域向多个负荷中心供电时,使用多端直流输电相比两端点对点直流输电更加经济和灵活。基于电压源换流器(VSC)的柔性直流输电(VSC-HVDC)系统相比基于电网换相型换流器的高压直流输电(LCC-HVDC)系统,具有潮流翻转时电压极性不变、不存在逆变侧换相失败问题等优点^[4-6],更适用于构建多端直流系统。随着VSC-HVDC技术及相应的电力电子器件技术不断成熟,远距离大容量输电的特高压直流系统采用VSC-HVDC或结合了VSC-HVDC、LCC-HVDC技术的混合直流输电(hybrid HVDC)技术^[7-8]来组建多端直流系统成为了热门研究方向。

多端直流系统的灵活性主要体现在系统运行方式较多,而换流站具备在线投退功能不同运行方式间相互转换的最佳方案。为了应对直流线路故障,针对VSC的多端直流系统,国内外学者开展了关于直流断路器、具有故障自清除能力子模块和增加辅助电路的相关研究^[9-11],换流站的在线投退策略也应结合具体的拓扑方案一并进行研究。直流断路器依靠其强大的直流电流分断能力,可以高速隔离故障再启动或永久隔离故障,实现方式最为简单,但直流断路器结构复杂、价格高昂;含阻尼模块的换流阀可以显著降低流过的故障电流,再由配置的直流

分断能力较弱的开关设备(如小电流直流断路器或谐振开关)来隔离故障再启动或永久隔离故障,实现方式较为简单,但对阻尼模块和开关设备的要求较高且价格较高;具有故障自清除能力的子模块(如全桥模块)可以通过控制实现向故障点流入“零”电流,待直流线路去游离后再启动或由配置的弱直流分断能力开关设备永久隔离故障,增加的设备结构简单、价格相对低廉(需要合理配置故障自清除子模块的数量),但实现方式最为复杂、对控制系统要求高。国内已投运的南澳三端柔性直流工程和张北柔性直流电网工程均采用了直流断路器配合半桥模块换流阀的方案^[12-13],舟山五端柔性直流工程采用了直流断路器或直流谐振开关配合阻尼/半桥混合模块换流阀的方案^[14-15]。随着直流电压等级向特高压发展,直流断路器的成本和体积急剧增大,谐振开关的制造难度也显著升高。采用故障自清除换流阀并在直流线路上配置由高压交流开关改造成的直流高速开关(HSS),是现有技术水平下特高压应用场合的较佳选择。乌东德特高压三端混合直流工程(以下简称昆柳龙工程)即选择了HSS配合全/半桥混合模块换流阀的硬件方案^[16-17]。

目前,基于直流断路器的VSC换流站在线投退策略已有相关研究^[15],全部采用电网换相换流器(LCC)换流阀的换流站在线投退策略也有文献提及^[18],而基于HSS的VSC换流站投退策略尚未见报道。本文从HSS的电气特性出发,结合全/半桥混合模块换流阀的能力,分析HSS电路的配置原则,解决多端直流中存在的多VSC换流站充电投入问题,并研究换流站在线投退控制策略;从设备安全和直流系统稳定运行角度,研究HSS的保护策略和动作结果。最后将研究结果应用于昆柳龙工程中,并在实时数字仿真系统(RTDS)上验证所提换流站在线

投退策略和多VSC换流站充电投入策略的可行性和正确性。

1 HSS的配置原则

HSS本体没有配置灭弧装置,其分断直流电流的能力极弱,因此配置HSS的换流站必须采用故障自清除子模块的换流阀,且HSS相关电路还需满足以下要求。

1)HSS两侧均配置电压互感器。

电压互感器用于判断HSS端口电压是否满足操作条件。HSS端口电压的变化范围很宽:一侧带电、另一侧不带电时为端对地的额定电压;两侧均带电时最小为0。为了避免合闸时产生较高的电流冲击,HSS合闸操作前应尽量将端口电压调整至最低。因此,控制系统可在投站前先将换流站侧电压控制到与运行的直流系统电压一致,即端口电压由HSS两侧均配置的电压互感器的电压相减得到,更适合工程应用。

2)HSS回路需配置独立电流互感器。

电流互感器用于判断HSS分断电流是否满足条件。与线路的额定电流相比,HSS直流电流分断值非常小,为了保证测量精度,HSS回路必须配置独立的电流互感器进行采集,不应由多个电流互感器测量值间接计算得到。

3)搭配隔离刀闸。

HSS仅起快速隔离作用,长期隔离仍需要配置隔离刀闸来实现可靠电气阻断。隔离刀闸与HSS搭配使用,一起配置在各站与直流系统的连接处。

4)换流阀具备输出直流零压的能力。

换流阀采用故障自清除模块的比例要适当提升,且其应具备输出直流零压的能力。为了适应HSS极低的分断直流电流能力,控制系统先将直流电压降低到0再切断回路,将更利于HSS成功分断。

根据以上原则可得到三端直流系统的HSS典型电路如图1所示。换流站 $x(x=1,2,3)$ 经过直流线路和HSS $_x$ 相关电路后连接至直流母线。HSS $_x$ 两侧各配置1个电压测点(对应的测量值分别为 $U_{DL,x}$ 和 $U_{DL,BUS}$),单侧配置1个电流测点(对应的测量值为 $I_{DL,x}$)。HSS $_x$ 两侧各配置1台隔离刀闸 Q_{x1} 和 Q_{x2} :当换流站 x 与直流系统连接时,HSS $_x$ 、 Q_{x1} 和 Q_{x2} 均在合位;当换流站与直流系统隔离时, Q_{x1} 和 Q_{x2} 均在分位。

2 多VSC换流站协同充电策略

与LCC换流阀充电时直流侧无压不同,VSC换流阀充电时会给连接的直流母线和其他VSC换流阀充电,因此多端直流系统中若包含2座及以上的VSC换流站,则需要解决多VSC换流站充电投入问题,即研究多VSC换流站的协同充电策略。VSC换

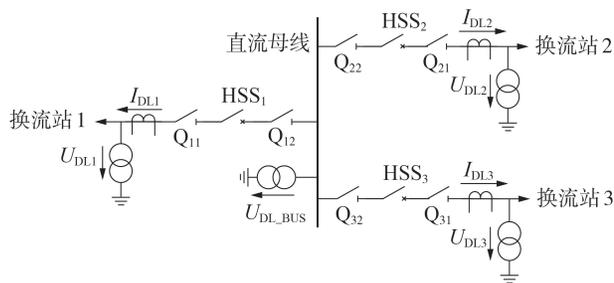


图1 HSS典型电路示意图

Fig.1 Schematic diagram of typical HSS circuit

流阀的充电方式有交流充电和直流充电2种:交流充电由本站的交流侧电源供电,其回路串入的子模块个数较少,初始不控充电后子模块电压高,换流阀在不控充电状态下能够较长时间(一般要求30 min以上)维持在稳定状态,交流可控充电后再将子模块电压进一步升至额定值并控制子模块均压;直流充电指从直流母线取能,其回路串入的子模块个数较多,初始不控充电后子模块电压低,需尽快转为直流可控充电状态,避免子模块电压发散。多端直流工程若要使用直流充电方式,控保系统需能够实时监测直流充电状态并与阀控配合自动转为直流可控充电模式,且充电电阻参数需要按所有换流站一起充电的能量需求进行设计。

当工程配置有HSS电路且VSC换流站均具备交流电源时,VSC换流阀充电可以设计为仅采用交流充电方式,避免直流充电带来的复杂性并降低充电电阻的能量要求。基于HSS电路设计的多VSC换流站协同充电策略具体步骤如下:

1)1座VSC换流站与直流母线和所有LCC换流站相连接,其余VSC换流站均与直流母线隔离,各站带直流线路采用交流充电方式充电,将换流阀子模块和直流线路充电至稳定值;

2)若检测到与直流母线隔离的VSC换流站的HSS两侧电压差的绝对值 $|U_{DL,x} - U_{DL,BUS}|$ 小于设定值,则首先合上隔离刀闸 Q_{x1} 和 Q_{x2} ,然后合上HSS $_x$,完成换流站 x 与直流母线的带电连接。

在VSC换流站与直流母线连接前,各VSC换流站换流阀已通过交流充电将子模块电压升至额定值并均压,因此从根本上杜绝了子模块电压发散的风险,各站充电电阻的能量也只需要考虑本站换流阀带直流线路的充电需求。若各站换流变阀侧电压相差较大,还可通过调节各站的换流变分接头档位进一步减小电压差,降低直流侧连接时的电压、电流波动。

3 换流站在线投退策略

HSS相当于没有灭弧能力的直流断路器,因此基于HSS设计的换流站在线投退策略需满足以下要求:

1)在投入时,合HSS是开关刀闸操作的最后一步,在退出时,分HSS是开关刀闸操作的第一步;

2)投入前尽可能控制HSS端口电压最小;

3)退出时需保证流过HSS的电流小于分断电流;

4)为了系统的安全稳定运行,退站过程中直流功率中断的时间越短越好。

3.1 换流站手动投入

换流站手动投入是指换流站直流侧与运行的直流系统隔离,经过一系列操作投入直流系统的过程。本文提出的换流站手动投入策略的流程图见附录A图A1,具体步骤如下:

1)待投入站 x 与运行的直流系统隔离,将待投入换流站带直流线路以直流电压控制模式操作至运行状态;

2)控保系统自动控制待投入站直流侧电压 U_{DLx} 与运行的直流系统电压 U_{DL_BUS} 相等,待HSS两侧电压差的绝对值小于投入允许值且持续超过预设时间后,点击“投入”按钮;

3)检测到HSS x 分位(若HSS x 在合位则分开HSS x),首先合上HSS x 两侧处于分位的隔离刀闸 Q_{x1} 和 Q_{x2} ,然后合上HSS x ;

4)检测到待投入站 x 已与直流系统连接,将其切换为功率控制模式并升至最小功率,投入完成。

3.2 换流站手动退出

换流站手动退出是指换流站处于运行的直流系统中,经过一系列操作退出直流系统的过程。本文提出的换流站手动退出策略的流程图见附录A图A2,具体步骤如下:

1)修改直流系统的功率指令,将待退出站 x 的直流功率降至最小值;

2)点击“退出”按钮,待退出站 x 将自动闭锁并跳开交流侧开关;

3)收到退站指令后,各功率站自动降功率、直流电压站自动将直流电压降至最小值,然后各站闭锁或移相;

4)检测到HSS x 流过的电流(实时值或平均值)小于允许分断值并持续超过预设时间后,下发HSS分闸命令;

5)检测到HSS x 分位,电压站解锁并恢复电压、各功率站解锁恢复电流、退出站继续分HSS两侧隔离刀闸和极隔离,退出完成。

3.3 换流站故障退出

换流站故障退出是指换流站发生区内故障,保护动作后将故障站退出、剩余直流系统继续保持运行的过程。故障退站与手动退站的最大区别是故障点可能会影响其他换流站的正常运行。为了避免非故障换流站因过流保护动作而跳闸,故障退站流程

在手动退站流程中增加了实时的防护措施,即如果运行站的线路电流反向超过限制值则立即闭锁。换流站故障退出策略与手动退出不一致部分的流程图见附录A图A3,具体步骤如下:

1)故障站保护动作后自动闭锁和跳开交流侧开关;

2)收到退站指令后,各功率站自动降功率、直流电压站自动将直流电压降至最小值,然后各站闭锁或移相,运行的VSC换流站若在此过程中检测到线路电流反向过流则直接闭锁;

3)转至换流站手动退出流程的步骤4)继续操作至退出完成。

3.4 换流站投退失败处理策略

换流站投入过程中若出现开关刀闸操作失败,由于换流站尚未与运行的直流系统产生电气连接,故控保系统停止操作并上报“投入失败”报警事件,并由运行人员根据一次设备状态安排后续操作。

换流站退出过程中,若HSS拒分,由于直流线路无法隔离,故应闭锁直流系统对应极;若HSS已分且其他站均成功重启,而其余的开关刀闸操作失败时,由于退出站已与直流系统电气隔离,故控保系统将停止操作上报“退出失败”报警事件,并由运行人员手动进行后续操作。

4 HSS保护策略

HSS保护可分2种类型:一种是针对HSS设备本体安全的保护,包括偷跳保护、失灵保护和端口过压保护;另一种是保障系统稳定运行的控制类保护,即退站超时保护。

4.1 偷跳保护

正常运行时如果HSS发生偷跳,则HSS合位消失并且有运行电流流过,偷跳保护根据此故障特征进行设计,动作策略是重合HSS开关,如果重合失败则闭锁直流系统对应极。

HSS偷跳保护的逻辑如图2所示。当换流器处于解锁运行状态时,若检测到HSS合位消失且HSS开关电流高于电流定值 I_{set} ,则延时 T_1 重合HSS开关、延时 T_2 闭锁对应极。

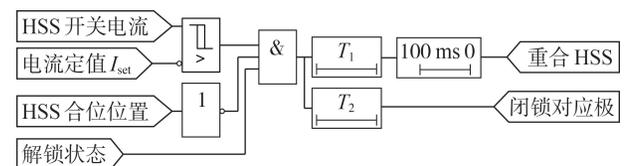


图2 HSS偷跳保护逻辑图

Fig.2 Logical diagram of HSS secret trip protection

4.2 失灵保护

进行HSS开关分闸操作前需要先将直流电流控制到分断电流以下,若HSS发生分闸失灵则大概率

是由机械故障引起且没有明显的电气量特征,因此只能通过分HSS开关命令和HSS分位位置实现分闸失灵保护,动作策略是闭锁直流系统对应极。

HSS失灵保护的逻辑框图如图3所示。从下发HSS分闸命令开始计时500 ms,若延时 T 内未检测到HSS变为分位,则闭锁对应极。

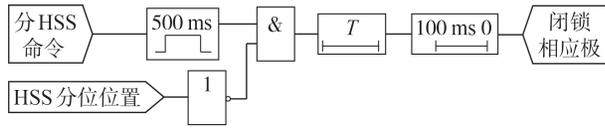


图3 HSS失灵保护逻辑图

Fig.3 Logical diagram of HSS failure protection

4.3 端口过压保护

HSS端口不能长时间耐受高压。若线路无流时HSS发生偷跳,则上述基于电流原理的偷跳保护并不会动作。为了保障设备的安全,配置基于电压判据的HSS端口过压保护,其动作结果为闭锁直流系统对应极。

HSS端口过压保护的逻辑如图4所示。当HSS与电压互感器间的隔离刀闸均处在合位时(可以监测端口电压),若检测到HSS合位消失且端口电压高于电压定值 U_{set} 、电流小于电流定值 I_{set} ,则延时 T 闭锁对应极。

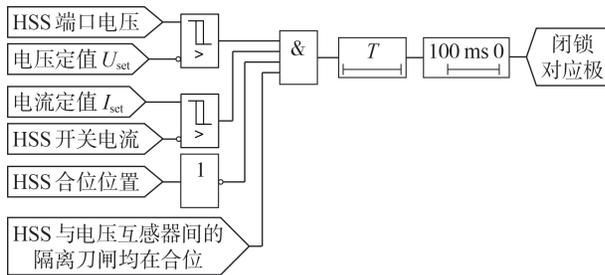


图4 HSS端口过压保护逻辑框图

Fig.4 Logical diagram of HSS over voltage protection

4.4 退站超时保护

退站过程中直流功率会出现短时中断再恢复,若中断持续的时间过长,则退站过程可能会引起稳控动作,不利于系统的安全稳定运行。配置退站超时保护,从退出站闭锁开始计时,若设定时间内未能收到相关HSS的分位信号,则永久闭锁直流系统对应极。

HSS退站超时保护的逻辑如图5所示。当换流站处于退站过程中时,从换流器闭锁后开始计时,若延时 T 内未检测到HSS变为分位则闭锁对应极。

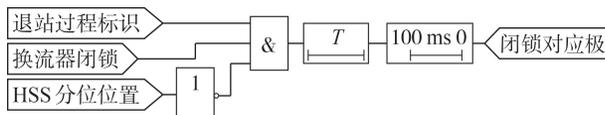


图5 退站超时保护逻辑图

Fig.5 Logical diagram of exit over time protection

5 试验验证

昆柳龙±800 kV特高压混合直流工程是世界上首个混合直流工程,其送端昆北站为LCC站、受端柳州站和龙门站均为VSC站,VSC站的换流阀均采用了全/半桥混合子模块。昆柳龙工程HSS相关配置电路如附录A图A4所示。图中: Q_{19} 和 Q_{39} 分别为柳州站和龙门站的极母线刀闸(主要用于极连接/隔离,本节分析时可以忽略);柳州站与汇流母线相连的HSS为 HSS_1 ,配置在极母线, HSS_1 仅配置了汇流母线侧隔离刀闸 Q_1 ,两侧电压测点测量值分别为 U_{DCH1} 和 U_{DL_BUS} ,单侧电流测点测量值为 I_{DLH1} ;龙门站与汇流母线相连的HSS为 HSS_2 ,配置在柳州站柳龙线路的连接处, HSS_2 两侧的隔离刀闸分别为 Q_{21} 和 Q_{22} ,两侧电压测点测量值分别为 U_{DL_BUS} 和 U_{DL_GD} ,单侧电流测点测量值为 I_{DL_GD} 。此外龙门站的极母线也配置了HSS(HSS_3),起到快速隔离龙门站和柳龙线路的作用, HSS_3 电流测点测量值为 I_{DLH3} ,仅配置了换流阀侧电压测点,其测量值为 U_{DCH3} ;昆北站经昆柳线与汇流母线采用隔离刀闸 Q_0 相连。该工程中HSS允许分断的直流电流为20 A(控保限制为15 A),直流功率中断时间(从中断开始到恢复至90%)的允许值为600 ms。

柳州站和龙门站都是VSC站,因此采用了本文提出的多VSC换流站协同充电策略。试验初始 Q_{21} 、 Q_{22} 和 HSS_2 保持分位,将 Q_0 和 Q_1 操作至合位,分别使柳州站换流阀带汇流母线和昆北站充电、龙门站换流阀带柳龙线充电。待两站的换流阀子模块均已完成可控充电后,再依次合上 Q_{21} 、 Q_{22} 和 HSS_2 将柳龙线连接,完成三站带电连接。利用RTDS验证上述多VSC换流站协同充电策略, HSS_2 合闸时刻的仿真波形如图6所示,图中 S_{HSS2} 为 HSS_2 的合位信号。由于柳州站换流变阀侧电压比龙门站换流变阀侧电压低,因此在 HSS_2 合闸前,柳州站的汇流母线电压 U_{DL_BUS} 比柳龙线电压 U_{DL_GD} 低了约70 kV; HSS_2 合闸

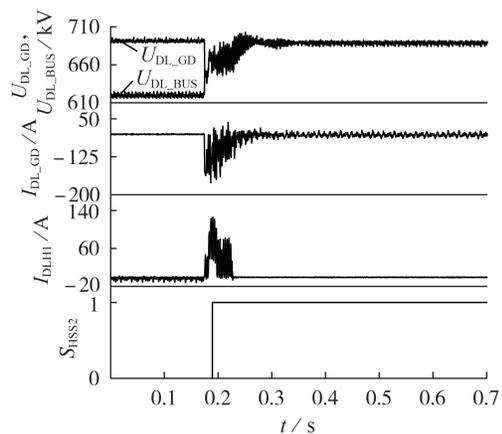
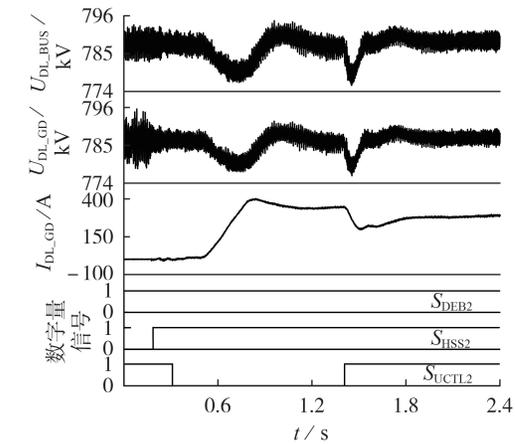


图6 协同充电过程中柳龙线仿真波形

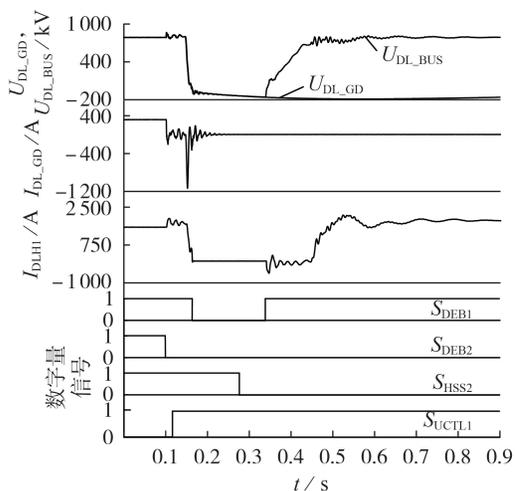
Fig.6 Simulative waveforms of LL line during cooperative charging process

后,龙门站通过直流线路继续给其他两站充电直至稳定。在HSS₂合闸期间,直流电压和直流电流的波动都较小。

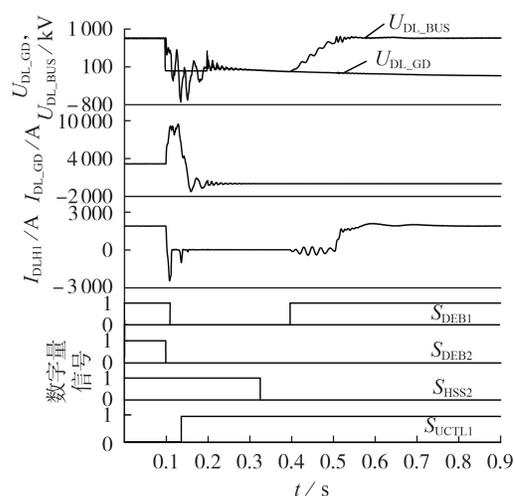
基于HSS换流站投退策略的龙门站仿真结果如图7所示。图中: S_{DEBY} 为换流阀解锁信号, $y=1$ 、 $y=2$



(a) 在线投入波形



(b) 在线退出波形



(c) 故障退出波形

图7 昆柳龙工程的龙门站投退波形

Fig.7 Entry and exit waveforms of LM station in KLL project

分别表示为柳州站、龙门站,后同; S_{UCTLy} 为直流电压控制标志, $S_{UCTLy}=1$ 表示直流电压控制, $S_{UCTLy}=0$ 表示直流功率控制。

图7(a)为龙门站的在线投入波形。龙门站带柳龙线解锁后,依次合上 Q_{21} 、 Q_{22} 和HSS₂,然后将龙门站切换为功率控制站并将直流功率升至最小值0.1 p.u.。昆柳龙工程要求三站运行时龙门站固定为电压站,因此龙门站投入1 s后又自动切换回直流电压控制站,柳州站切换为功率控制站。整个投入过程符合设计,直流电压和直流电流的波动都较小。图7(b)为龙门站的在线退出波形。龙门站先闭锁,柳州站接管直流电压控制并降压后闭锁、昆北站移相,待柳龙线的 I_{DL_GD} 降至15 A以下后分开HSS₂,然后柳州站重新解锁升压、昆北站恢复功率,直流功率中断时间约为350 ms。图7(c)为龙门站的故障退出波形。龙门站极母线接地故障后立即闭锁,柳州站接管直流电压控制,由于柳州站极母线电流 I_{DLH1} 反向过流也立即闭锁、昆北站移相,待柳龙线 I_{DL_GD} 降至15 A以下后分开HSS₂,然后柳州站重新解锁升压、昆北站恢复功率,直流功率中断时间约为400 ms。

柳州站的在线投退仿真结果如附录A图A5所示。图A5(a)为柳州站的在线投入波形。柳州站单站解锁时HSS₁在合位,投站时会先分开HSS₁,然后合上 Q_2 ,接着重新合上HSS₁并切换为功率控制站,在HSS₁合上后将直流功率升至最小值0.1 p.u.。整个投入过程符合设计,直流电压和直流电流的波动都较小。图A5(b)为柳州站的在线退出波形。柳州站先闭锁,龙门站降压后闭锁、昆北站移相,待柳州站 I_{DLH1} 降至15 A以下后分开HSS₁,随后龙门站重新解锁升压、昆北站恢复功率,直流功率中断时间约为380 ms。

值得注意的是,非退出VSC站仅能将其输出的直流端口电压快速降至0,由于直流线路很长,其沿线对地电容仍然会残余一些能量。因此,在所有站均闭锁/移相后,直流母线仍可能存在一定电压,如图7(b)中, U_{DL_BUS} 在柳州站重新解锁前接近-200 kV。不过此时直流回路已“断开”,该电压对HSS的分闸电流影响很小。仿真结果表明,VSC站在线退出时的直流功率中断时间能够满足工程要求。

6 结论

特高压多端直流系统中采用故障自清除VSC换流阀和HSS相配合的方案具备较佳的经济性和可行性。本文对基于HSS的多端直流系统在线投退策略、多VSC换流站协同充电策略和HSS保护策略开展了研究和应用,可以得出以下结论:

1)所提多换流站协同充电策略可以避免VSC换流阀充电过程中子模块电压发散风险,同时降低了

充电电阻的能量要求;

2)所提基于HSS的换流站在线投退策略以及HSS的详细保护配置方案,可以满足多端直流系统运行方式的在线转换以及对HSS主设备的保护;

3)在昆柳龙混合直流工程的RTDS上验证了多VSC换流站协同充电策略和换流站在线投退策略的正确性和有效性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 徐政,屠卿瑞,管敏渊,等. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2013:7-12.
- [2] 蔡静,董新洲. 高压直流输电线路故障清除及恢复策略研究综述[J]. 电力系统自动化,2019,43(11):181-190.
CAI Jing,DONG Xinzhou. Overview on research of fault clearing and recovery strategy for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(11):181-190.
- [3] 郑超,马世英,申旭辉,等. 强直弱交的定义、内涵与形式及其应对措施[J]. 电网技术,2017,41(8):2491-2498.
ZHENG Chao,MA Shiyang,SHEN Xuhui,et al. Definition, connotation and form of strong HVDC and weak AC and countermeasures for stable operation of hybrid power grid[J]. Power System Technology,2017,41(8):2491-2498.
- [4] WANG Wenyuan,BARNES M. Power flow algorithms for multi-terminal VSC-HVDC with droop control[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29(4):1721-1730.
- [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,吴方劼,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.
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] 张文亮,汤涌,曾南超. 多端高压直流输电技术及应用前景[J]. 电网技术,2010,34(9):1-6.
ZHANG Wenliang,TANG Yong,ZENG Nanchao. Multi-terminal HVDC transmission technologies and its application prospects in China[J]. Power System Technology,2010,34(9):1-6.
- [8] 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.
- [9] 刘剑,邵能灵,范春菊,等. 柔性直流输电线路故障处理与保护技术评述[J]. 电力系统自动化,2015,39(20):158-167.
LIU Jian,TAI Nengling,FAN Chunju,et al. Comments on fault handling and protection technology for VSC-HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(20):158-167.
- [10] 李斌,何佳伟,李晔,等. 柔性直流输电系统新型故障重启方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):77-85,167.
LI Bin,HE Jiawei,LI Ye,et al. Novel restart scheme of DC fault for flexible DC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(12):77-85,167.
- [11] 严铭,蔡晖,谢珍建,等. 适用于多端柔性直流输电系统的分布式直流电压控制策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):

134-140.

- YAN Ming,CAI Hui,XIE Zhenjian,et al. Distributed DC voltage control strategy for VSC-MTDC systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(3):134-140.
- [12] 刘涛,董天雪,周鹏,等. 南澳多端VSC-HVDC工程直流断路器的控制策略研究[J]. 自动化与仪表,2019(1):12-14,57.
LIU Tao,DONG Tianxue,ZHOU Peng,et al. Study on DC circuit breaker control strategy for Nan'ao multi-terminal vsc-hvdc project[J]. Automation & Instrumentation,2019(1):12-14,57.
- [13] 郭贤珊,周杨,梅念,等. 张北柔性直流电网故障电流特性及抑制方法研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(18):5438-5446.
GUO Xianshan,ZHOU Yang,MEI Nian,et al. Research on the fault current characteristic and suppression strategy of Zhangbei project[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(18):5438-5446.
- [14] 王柯,李继红,田杰,等. 多端柔性直流故障快速恢复系统控制策略[J]. 供用电,2017,34(8):2-7,22.
WANG Ke,LI Jihong,TIAN Jie,et al. Control strategy of quick recovery system with multi-terminals HVDC DC fault[J]. Distribution & Utilization,2017,34(8):2-7,22.
- [15] 裘鹏,黄晓明,王一,等. 高压直流断路器在舟山柔直工程中的应用[J]. 高电压技术,2018,44(2):403-408.
QIU Peng,HUANG Xiaoming,WANG Yi,et al. Application of high voltage DC circuit breaker in Zhoushan VSC-HVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering,2018,44(2):403-408.
- [16] 王杨正,杨建明,鲁江,等. 配置HSS的并联多端高压直流输电线路保护选择性研究[J]. 电力工程技术,2020,39(1):95-102.
WANG Yangzheng,YANG Jianming,LU Jiang,et al. Line protection selectivity of the parallel multi-terminal HVDC with HSS[J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(1):95-102.
- [17] 刘静佳,梅红明,刘树,等. 特高压多端混合直流输电系统阀组计划投/退控制方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):158-165.
LIU Jingjia,MEI Hongming,LIU Shu,et al. Planned valve group entry/exit control method for UHV multi-terminal hybrid HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(9):158-165.
- [18] 彭忠,魏金科,赵静,等. 并联型多端直流输电系统运行方式研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(16):180-187.
PENG Zhong,WEI Jinke,ZHAO Jing,et al. Operation mode research on parallel multi-terminal HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control,2019,47(16):180-187.

作者简介:



黄如海

luj@nrec.com);

董玉龙(1977—),男,研究员级高级工程师,硕士,主要研究方向为高压直流输电、柔性直流输电及柔性交流输电技术等(E-mail:dongyl@nrec.com)。

黄如海(1987—),男,工程师,硕士,主要研究方向为柔性直流输电及柔性交流输电技术等(E-mail:huangrh@nrec.com);

邱德锋(1986—),男,工程师,硕士,主要研究方向为柔性直流输电及柔性交流输电技术等(E-mail:qiudf@nrec.com);

鲁江(1979—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为高压直流输电、柔性直流输电及柔性交流输电技术等(E-mail:

(编辑 任思思)

(下转第153页 continued on page 153)

ZHOU Shibing, XU Zhenyuan, TANG Xuqing. Method for determining optimal number of clusters in *K*-means clustering algorithm[J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(8): 1995-1998.

作者简介:

汪颖(1981—),女,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电能质量与优质供电(E-mail:20312028@qq.com);

杨维(1996—),男,硕士研究生,研究方向为负荷特性



汪颖

分析与负荷辨识等;

肖先勇(1968—),男,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电能质量与优质供电等(E-mail:xiaoxianyong@163.com);

张姝(1988—),女,助理研究员,博士,通信作者,研究方向为配电网保护与定位、电能质量与优质供电(E-mail:zs20061621@163.com)。

(编辑 王锦秀)

Clustering and analysis of electricity consumption behavior of massive users based on network feature dimension reduction of denoising autoencoder and improved mini-batch *K*-means algorithm

WANG Ying, YANG Wei, XIAO Xianyong, ZHANG Shu

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The mining and analysis of electricity consumption features of massive users is of great significance for realizing bi-directional interaction between power grid and users. An algorithm suitable for clustering and analysis of electricity consumption behavior of massive users is proposed to reduce the time complexity of the algorithm and improve the load data analysis efficiency of massive users. The electricity consumption behavior features of the users are extracted, and a multi-layer denoising autoencoder network is built to realize dimension reduction of multi-dimensional features. The mini-batch *K*-means algorithm is used for clustering analysis, and the improvements of initial clustering centroid optimization and hyperparameter optimization on the algorithm are carried out to improve the convergence speed and effect of the algorithm, in which, the hyperparameter optimization is carried out with Bayesian optimization algorithm based on Gaussian process. The related indexes of separation degree between the clusters and the cohesion degree within the clusters are used to evaluate the clustering effect. The effective clustering features are screened through mutual information to realize user portraits. The case results show that the proposed method has good performance in feature optimization, clustering effect and convergence speed.

Key words: electricity consumption behavior; feature dimension reduction; clustering analysis; mutual information; mini-batch *K*-means algorithm; hyperparameter optimization; Bayesian optimization

(上接第137页 continued from page 137)

Online entry and exit control strategy for single converter station based on DC high speed switch

HUANG Ruhai¹, QIU Defeng¹, LU Jiang¹, DONG Yunlong¹, GAN Zongyue²

(1. Nanjing Nari-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. EHV Power Transmission Company of China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: In multi-terminal UHVDC (Ultra High Voltage Direct Current) projects, it is a good choice to realize DC fault clearing and online entry and exit of converter station by using DC HSS (High Speed Switch) combined with full/half-bridge hybrid-module converter valves. However, the weak DC current breaking capacity of HSS puts forward strict requirements for the control and protection equipment, and the online entry and exit strategy of converter station under this mode has not been reported yet. Based on the electrical characteristics of HSS and the ability of hybrid-module converter valves, the configuration principle of HSS is analyzed and the typical circuit of HSS is designed. Then, the online entry and exit strategy for converter station based on HSS and the cooperative charging scheme of multiple VSC (Voltage Source Converter) converter stations are studied. Finally, in order to ensure the safety of system and equipment, the detailed protection strategies of HSS and their action results are proposed. All of the proposed strategies have been applied in KLL hybrid DC project, and the research results can provide reference for single station entry and exit scheme of multi-terminal DC projects.

Key words: DC high speed switch; online entry and exit; operation mode; VSC-HVDC power transmission; hybrid HVDC power transmission

附录 A

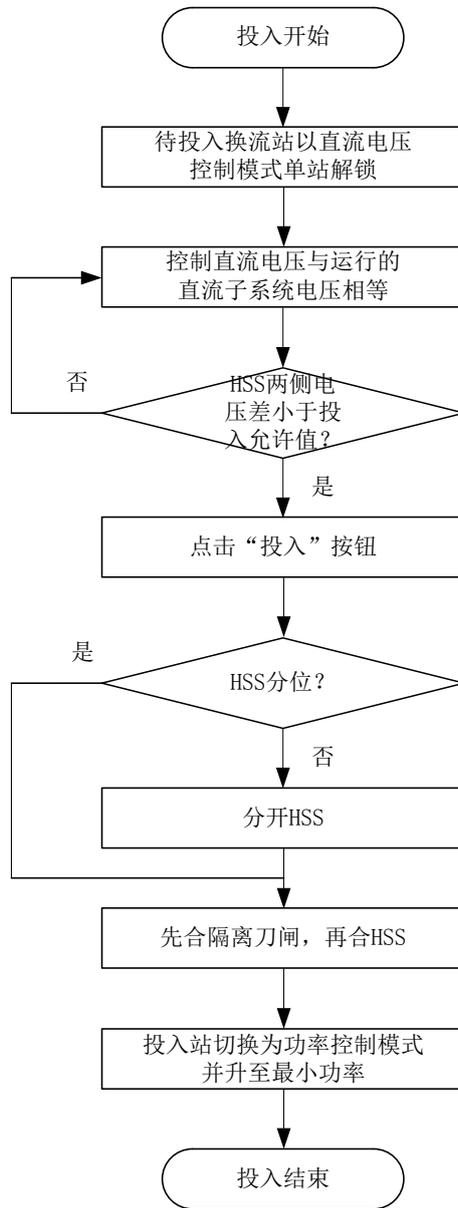


图 A1 换流站手动投入流程图

Fig.A1 Flowchart of manual entry for converter station

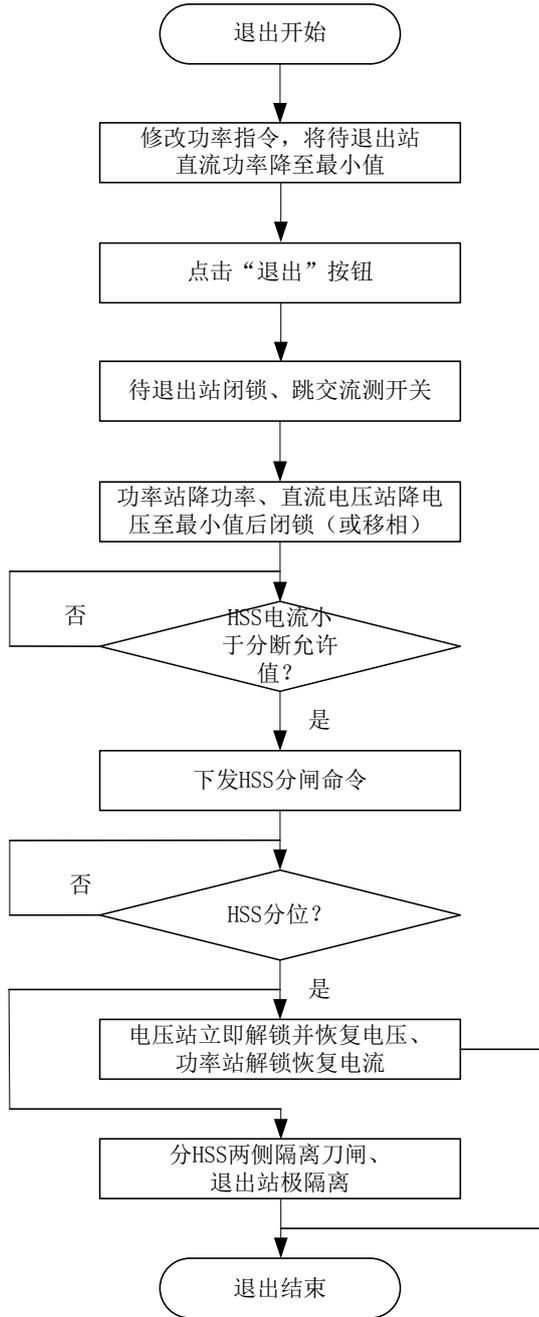


图 A2 换流站手动退出流程图

Fig.A2 Flowchart of manual exit for converter station

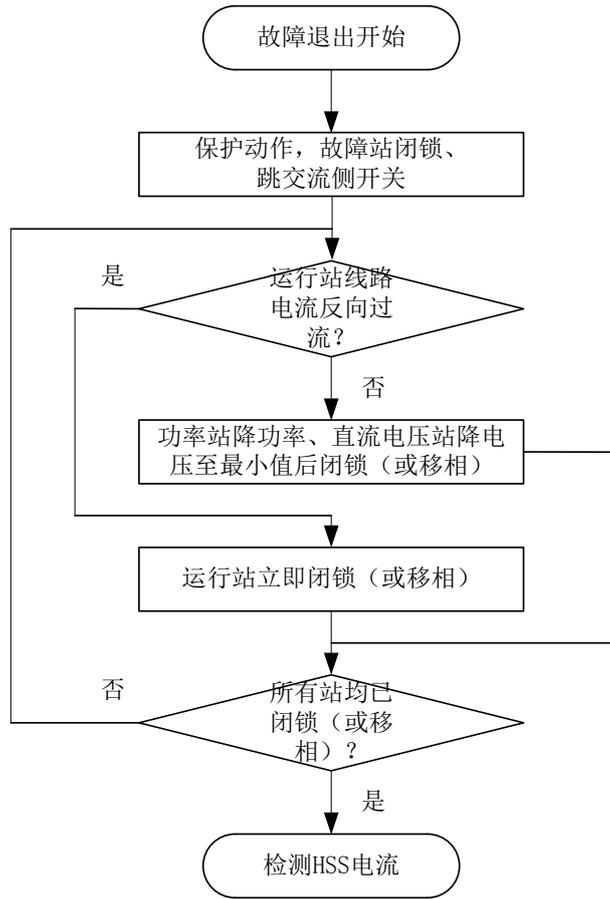


图 A3 换流站故障退出部分流程图

Fig.A3 Flowchart of fault exit for converter station

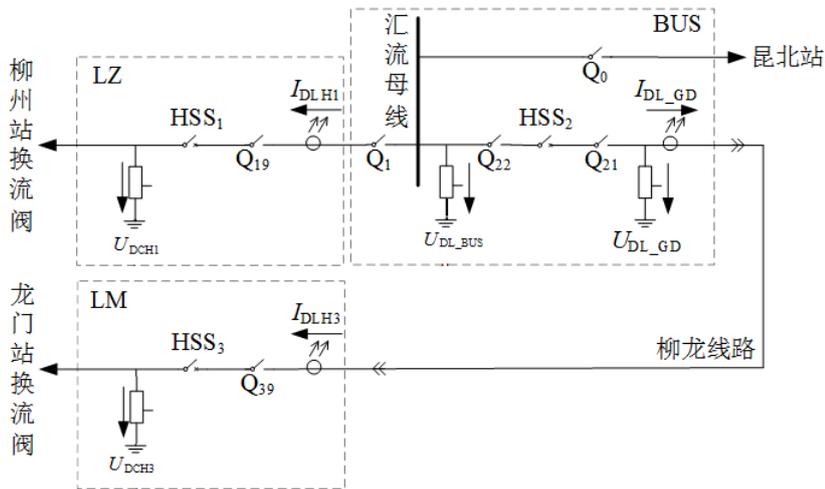
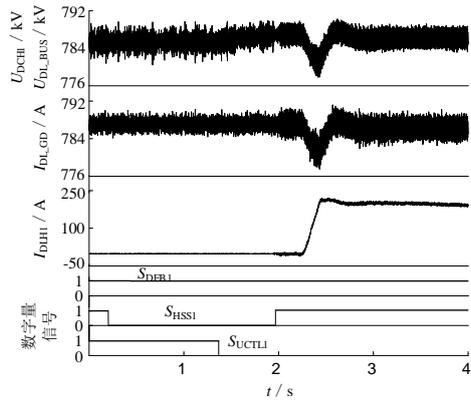
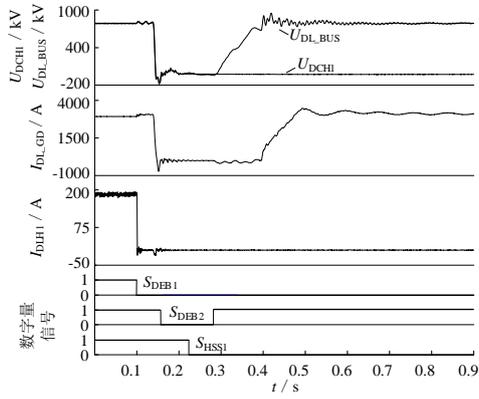


图 A4 昆柳龙工程 HSS 相关电路示意图

Fig.A4 HSS circuit of KLL project



(a) 在线投入波形



(b) 在线退出波形

图 A5 昆柳龙工程的柳州站投退波形

Fig.A5 Entry and exit waveforms of LZ station in KLL project