



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 111884246 A

(43) 申请公布日 2020. 11. 03

(21) 申请号 202010900959.6

H02J 3/38 (2006.01)

(22) 申请日 2020.08.31

H02H 7/26 (2006.01)

(71) 申请人 华中科技大学

地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路  
1037号

申请人 国网江苏省电力有限公司  
中国电力科学研究院有限公司

(72) 发明人 孟沛彧 向往 迟永宁 王志冰  
荆江平 文劲宇

(74) 专利代理机构 华中科技大学专利中心  
42201

代理人 尹丽媛 李智

(51) Int. Cl.

H02J 3/36 (2006.01)

H02M 7/483 (2007.01)

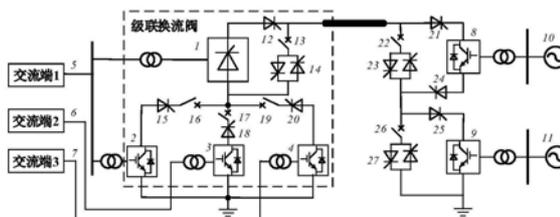
权利要求书2页 说明书8页 附图5页

(54) 发明名称

一种分层混联直流输电系统及其直流故障清除方法

(57) 摘要

本发明属于电力系统输配电领域,具体公开了一种分层混联直流输电系统及其直流故障清除方法,包括整流侧级联的高压阀组和低压阀组,高压阀组包括n个并联的换流器,低压阀组包括m个并联的换流器;各换流器分别与之对应的交流端连接;其中,各换流器独立接入交流端或多个换流器共同接入同一个交流端,各换流器与各交流端之间的对应连接关系由各换流器类型以及输电系统交流端的电网类型和个数确定。另外,交流端可为交流电网或多种新能源基地,且级联换流阀具备多种工作模式。本发明能够在降低直流系统总体制造成本的前提下能够同时实现高电压、远距离、大容量直流功率传输以及多规模能源基地分层接入,提升输电效率与电网灵活性。



1. 一种分层混联直流输电系统,其特征在于,包括整流侧级联的高压阀组和低压阀组,高压阀组包括 $n$ 个并联的换流器,低压阀组包括 $m$ 个并联的换流器;各换流器分别与之对应的交流端连接;

其中,各换流器独立接入交流端或多个换流器共同接入同一个交流端,各换流器与各交流端之间的对应连接关系由各换流器类型以及所述输电系统交流端的电网类型和个数确定。

2. 如权利要求1所述的一种分层混联直流输电系统,其特征在于,高压阀组并联换流器的个数 $n$ 为1,低压阀组并联换流器的个数 $m$ 为3。

3. 如权利要求2所述的一种分层混联直流输电系统,其特征在于,所述交流端的个数为三个,则所述高压阀组中的换流器交流侧与所述低压阀组中三个换流器中的一个换流器交流侧共同接入第一交流端,低压阀组中另一个换流器的交流侧接入第二交流端,低压阀组中第三个换流器的交流侧接入第三交流端。

4. 如权利要求1所述的分层混联直流输电系统,其特征在于,高压阀组和低压阀组的交流端为强交流电网、弱交流电网、新能源孤岛或以上三种组合接入。

5. 如权利要求1至4任一项所述的分层混联直流输电系统,其特征在于,在不同的交流端下,所述高压阀组中的换流器为电网换相换流器、半桥型模块化多电平换流器、全桥型模块化多电平换流器或混合型模块化多电平换流器。

6. 如权利要求1所述的一种分层混联直流输电系统,其特征在于,所述输电系统的逆变侧包括高压阀组换流器和低压阀组换流器;所述高压阀组换流器和所述低压阀组换流器串联后,与位于整流侧的级联换流阀直流侧并联;

所述逆变侧的高压阀组与低压阀组所用换流器为电网换相换流器、半桥型模块化多电平换流器、全桥型模块化多电平换流器或混合型模块化多电平换流器。

7. 如权利要求6所述的分层混联直流输电系统,其特征在于,所述整流侧高压阀组并联有高压晶闸管和机械开关,且串联有高压晶闸管,用于旁路高压阀组;所述整流侧低压阀组各个支路上串联有低压晶闸管以及机械开关,用于旁路低压阀组中换流器;所述逆变侧的高压阀组与低压阀组均并联有晶闸管与机械开关,并串联有晶闸管;

通过切换所述输电系统中的高压晶闸管、低压晶闸管以及机械开关的状态,使得所述分层混联直流输电系统工作于分层级联工作模式或单层柔直工作模式。

8. 如权利要求6所述的分层混联直流输电系统,其特征在于,所述整流侧的级联换流阀的直流侧与所述逆变侧的高压阀组换流器的直流侧之间采用不对称正极接线方式、不对称负极接线方式或双极性接线方式。

9. 一种如权利要求1至8任一项所述的分层混联直流输电系统的直流故障清除方法,其特征在于,控制所述分层混联直流输电系统中各换流器之间的配合执行,将所述分层混联直流输电系统整流侧与逆变侧的故障电流限制为0,实现直流故障的清除。

10. 如权利要求9所述的直流故障清除方法,其特征在于,当所述输电系统为如权利要求3所述的输电系统,且整流侧高压阀组中换流器为电网换相换流器、整流侧低压阀组中换流器为半桥型模块化多电平换流器,则故障清除方法包括:

S1:判断所述输电系统直流侧是否发生故障,若是,则进入S2,否则重复S1;

S2:闭锁所述输电系统中模块化多电平换流器,从而阻断子模块电容放电通路;高压阀

组换流器由定直流电压控制切换为定触发角控制,通过强制移相实现该换流器输出负压,低压阀组各换流器输出电压仍为正,输电系统直流侧电压为零,抑制短路电流上升,高压阀组换流器切换为逆变状态同时阻断了第一、第二和第三交流端经低压阀组的放电通路,直流输电系统逆变侧利用高压晶闸管与低压晶闸管的单向导通特性阻断故障电流;

S3、故障点去游离过程完成后,控制分层混联直流输电系统重新启动,并解锁模块化多电平换流器,同时高压阀组换流器恢复定直流电压控制;触发逆变侧晶闸管组,使系统恢复正常功率传输。

## 一种分层混联直流输电系统及其直流故障清除方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于电力系统输配电技术领域,更具体地,涉及一种分层混联直流输电系统及其直流故障清除方法。

### 背景技术

[0002] 在当前能源安全问题突出、环境污染情况严峻的背景下,为了实现能源低碳转型、雾霾治理以及环境保护,需发展风电等可再生能源。到2019年底,全国风电累计装机2.1亿千瓦,占全部发电装机的10.4%,其中陆上风电累计装机2.04亿千瓦。随着陆上风电装机容量快速提升,研究适合于陆上风电远距离大规模送出的换流器选择十分重要。目前可应用于连接陆上大型风电基地的换流器主要有电网换相换流器(line commutated converter, LCC)与模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)。

[0003] 电网换相换流器(LCC)不具备自换相能力,由于独立运行的风电场难以建立稳定的交流电压,因此LCC不能直接连接风电基地。模块化多电平换流器(MMC)可以独立调节有功无功功率,能够为弱交流系统甚至无源系统供电,可直接连接风电场。然而其成本高、容量小以及无法有效处理直流故障的缺点使其难以满足风电大规模输送的要求。

[0004] 为解决新能源大规模远距离输送问题,以风电基地为例,目前有三种方案。第一,从提升交流系统强度的角度,在风电场附近配套建设火电或者水电机组,将风电与传统能源发电捆绑输送到负荷中心。第二,从改善换流设备换相能力的角度,采用静止同步补偿器或同步调相机与LCC并联,为LCC提供稳定的换相电压。第三,从改进换流器设备的角度,采用LCC-MMC混合型输电系统,结合两种换流器的优势,以更具经济性的方案实现新能源输送。

[0005] 其中,针对提升交流系统强度,目前已有哈密—郑州±800kV特高压直流输电工程,其将中国西北地区火电、风电基地打捆送出(徐式蕴,吴萍,赵兵,等.提升风火打捆哈邦特高压直流风电消纳能力的安全稳定控制措施研究[J].电工技术学报,2015,30(13):92-99)。

[0006] 针对改善换流设备换相能力,中国电力科学研究院的王雅婷等人提出可以利用大容量调相机提升系统动态无功储备,解决弱送端电网的支撑问题,加强系统的电压支撑和运行灵活性(王雅婷,张一驰,周勤勇,等.新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J].电网技术,2017,41(01):22-28)。英国诺丁汉大学的Serhiy Bozhko等人提出了在新能源基地交流侧并联静止同步补偿器,实现大规模风电基地经基于电网换相换流器的高压直流输电系统(LCC-HVDC)与陆上电网连接(BOZHKO S, BLASCO-GIMENEZ R, LI R, et al. Control of offshore DFIG-based wind farm grid with line-commutated HVDC connection[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 71-78)。

[0007] 针对改进换流器设备的角度,韩平平等人提出了一种整流侧为MMC换流站,逆变侧为LCC换流站的端间混合结构(韩平平,陈凌琦,丁明,等.一种适用于风电外送的混合高压直流输电系统[J].太阳能学报,2019,40(08):2162-2169),林卫星等人设计了一种整流侧

采用LCC与MMC串联的端间混合结构(林卫星,文劲宇,王少荣,等.一种适用于风电直接经直流大规模外送的换流器[J].中国电机工程学报,2014,34(13):2022-2030)。

[0008] 上述打捆送出的方案,虽然能够实现新能源的远距离直流传输,但是受限于水资源、能源资源以及生态环境方面的约束,并非所有的新能源基地都有条件就近建设配套电厂。针对上述王雅婷等人以及Serhiy Bozhko等人的通过支撑装置为LCC提供稳定的换相电压方案,额外建设支撑装置加大了系统的投资以及维护成本,在经济性上不具备优势。而针对韩平等等人以及林卫星等人的LCC-MMC混合型输电系统方案,虽然解决了新能源基地与换流站的连接问题,但是混合型输电系统的传输功率受限于MMC换流站,难以满足大规模远距离输送的需求。

## 发明内容

[0009] 本发明提供一种分层混联直流输电系统及其直流故障清除方法,用以解决现有直流输电系统难以兼容低成本和高输电效率的技术问题。

[0010] 本发明解决上述技术问题的技术方案如下:一种分层混联直流输电系统,包括整流侧级联的高压阀组和低压阀组,高压阀组包括 $n$ 个并联的换流器,低压阀组包括 $m$ 个并联的换流器;各换流器分别与之对应的交流端连接;

[0011] 其中,各换流器独立接入交流端或多个换流器共同接入同一个交流端,各换流器与各交流端之间的对应连接关系由各换流器类型以及所述输电系统交流端的电网类型和个数确定。

[0012] 上述技术方案的基础上,本发明还可以做如下改进。

[0013] 进一步,高压阀组并联换流器的个数 $n$ 为1,低压阀组并联换流器的个数 $m$ 为3。

[0014] 进一步,所述交流端的个数为三个,则所述高压阀组中的换流器交流侧与所述低压阀组中三个换流器中的一个换流器交流侧共同接入第一交流端,低压阀组中另一个换流器的交流侧接入第二交流端,低压阀组中第三个换流器的交流侧接入第三交流端。

[0015] 进一步,高压阀组和低压阀组的交流端为强交流电网、弱交流电网、新能源孤岛或以上三种组合接入。

[0016] 进一步,在不同的交流端下,所述高压阀组中的换流器为电网换相换流器、半桥型模块化多电平换流器、全桥型模块化多电平换流器或混合型模块化多电平换流器。

[0017] 进一步,所述输电系统的逆变侧包括高压阀组换流器和低压阀组换流器;所述高压阀组换流器和所述低压阀组换流器串联后,与位于整流侧的级联换流阀直流侧并联;

[0018] 所述逆变侧的高压阀组与低压阀组所用换流器为电网换相换流器、半桥型模块化多电平换流器、全桥型模块化多电平换流器或混合型模块化多电平换流器。

[0019] 进一步,所述整流侧高压阀组并联有高压晶闸管和机械开关,且串联有高压晶闸管,用于旁路高压阀组;所述整流侧低压阀组各个支路上串联有低压晶闸管以及机械开关,用于旁路低压阀组中换流器;所述逆变侧的高压阀组与低压阀组均并联有晶闸管与机械开关,并串联有晶闸管;

[0020] 通过切换所述输电系统中的高压晶闸管、低压晶闸管以及机械开关的状态,使得所述分层混联直流输电系统工作于分层级联工作模式或单层柔直工作模式。

[0021] 进一步,所述整流侧的级联换流阀的直流侧与所述逆变侧的高压阀组换流器的直

流侧之间采用不对称正极接线方式、不对称负极接线方式或双极性接线方式。

[0022] 本发明还提供一种如上所述的分层混联直流输电系统的直流故障清除方法,控制所述分层混联直流输电系统中各换流器之间的配合执行,将所述分层混联直流输电系统整流侧与逆变侧的故障电流限制为0,实现直流故障的清除。

[0023] 进一步,当所述输电系统的交流端的个数为三个,整流侧高压阀组中的换流器交流侧与低压阀组中三个换流器中的一个换流器交流侧共同接入第一交流端,低压阀组中另一个换流器的交流侧接入第二交流端,低压阀组中第三个换流器的交流侧接入第三交流端;且整流侧高压阀组中换流器为电网换相换流器、整流侧低压阀组中换流器为半桥型模块化多电平换流器,则故障清除方法包括:

[0024] S1、判断所述输电系统直流侧是否发生故障,若是,则进入S2,否则重复S11;

[0025] S2:闭锁所述输电系统中模块化多电平换流器,从而阻断子模块电容放电通路;高压阀组换流器由定直流电压控制切换为定触发角控制,通过强制移相实现该换流器输出负压,低压阀组各换流器输出电压仍为正,输电系统直流侧电压为零,抑制短路电流上升,高压阀组换流器切换为逆变状态同时阻断了第一、第二和第三交流端经低压阀组的放电通路,直流输电系统逆变侧利用高压晶闸管与低压晶闸管的单向导通特性阻断故障电流;

[0026] S3、故障点去游离过程完成后,控制分层混联直流输电系统重新启动,并解锁模块化多电平换流器,同时高压阀组换流器恢复定直流电压控制;触发逆变侧晶闸管组,使系统恢复正常功率传输。

[0027] 总体而言,本发明的拓扑结构及其控制方法相比与现有技术,具有如下技术效果:

[0028] (1) 设计了分层混联直流输电系统的拓扑结构及其控制策略,结合了LCC换流器与MMC换流器的优势,使其能够同时实现新能源的直流汇集与分层接入以及高电压、大容量、远距离直流功率传输,提高输电效率以及电网灵活性。

[0029] (2) 本发明相比于已有的常见高压直流输电系统,在实现新能源孤岛接入的前提下显著降低了系统建设成本以及运行损耗,减少了汇集变压器的使用。

[0030] (3) 本发明中的送端交流系统可以为强交流电网、弱交流电网、新能源孤岛或以上三种组合。对于不同的交流系统,级联换流阀中的换流器可采用电网换相换流器、半桥模块化多电平换流器、全桥模块化多电平换流器或混合型模块化多电平换流器。

[0031] (4) 本发明中的级联结构,根据检修或故障等工况的需要,提出换流器的多种投切工作模式,通过晶闸管、机械开关的配合,使换流器平稳投入运行或退出运行,实现级联换流阀多种工作模式的切换。

[0032] (5) 设计了分层混联直流输电系统的直流故障清除策略:整流侧将高低压阀组切换为逆变状态,输出负压,抑制短路电流的上升;逆变侧利用晶闸管组的单向导通特性阻断故障电流。

## 附图说明

[0033] 图1为本发明实施例提供的一种分层混联直流输电系统示意图;

[0034] 图2为本发明实施例提供的整流侧级联换流阀的高压阀组与低压阀组分别由多个换流器并联组成的结构示意图;

[0035] 图3为本发明实施例提供的分层混联直流输电系统整流侧交流端示意图;

- [0036] 图4为由晶闸管构成的电网换相换流器拓扑结构图；
- [0037] 图5为模块化多电平换流器拓扑结构图；
- [0038] 图6为本发明实施例提供的多种工作模式结构示意图；
- [0039] 图7为本发明实施例提供的采用不对称正极性接线形式的分层混联直流输电系统示意图；
- [0040] 图8为本发明实施例提供的采用不对称负极性接线形式的分层混联直流输电系统示意图；
- [0041] 图9为本发明实施例提供的采用双极性接线形式的分层混联直流输电系统示意图；
- [0042] 图10为本发明实施例提供的另一种采用不对称正极性接线形式的分层混联直流输电系统示意图；
- [0043] 图11为本发明实施例提供的另一种采用不对称正极性接线形式的分层混联直流输电系统示意图。
- [0044] 在所有附图中,相同的附图标记用来表示相同的元件或者结构,其中:
- [0045] 1为高压阀组第一换流器、2为低压阀组第二换流器、3为低压阀组第三换流器、4为低压阀组第四换流器、5为整流侧第一交流端、6为整流侧第二交流端、7为整流侧第三交流端、8为逆变侧第五换流器、9为逆变侧第六换流器、10为逆变侧负荷中心1、11为逆变侧负荷中心2、12为整流侧串联高压晶闸管、13为整流侧高压阀组并联机械开关、14为整流侧并联高压晶闸管、15为第二换流器串联晶闸管、16为第二换流器串联机械开关、17为第三换流器串联机械开关、18为第三换流器串联晶闸管、19为第四换流器串联机械开关、20为第四换流器串联晶闸管、21为逆变侧串联高压晶闸管1、22为逆变侧高压阀组并联机械开关、23为逆变侧并联高压晶闸管、24为逆变侧串联高压晶闸管2、25为逆变侧串联低压晶闸管、26为逆变侧低压阀组并联机械开关、27为逆变侧并联低压晶闸管。

### 具体实施方式

[0046] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。此外,下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

[0047] 实施例一

[0048] 一种分层混联直流输电系统,包括整流侧级联的高压阀组和低压阀组,高压阀组包括n个并联的换流器,低压阀组包括m个并联的换流器;各换流器分别与之对应的交流端连接;

[0049] 其中,各换流器独立接入交流端或多个换流器共同接入同一个交流端,各换流器与各交流端之间的对应连接关系由各换流器类型以及所述输电系统交流端的电网类型和个数确定。

[0050] 现有输电系统只能实现单个新能源基地接入,或多个新能源基地交流汇集后集中接入,不利于新能源的高效利用。该方法目的在于实现陆上新能源孤岛的直流汇集与输送,在实现大容量远距离直流功率传输的同时,尽可能降低系统的投资成本,通过送端的混合

级联换流阀,实现了多规模能源基地的分层接入,提升了输电效率和电网灵活性,同时能够有效降低换相失败影响,充分发挥常规直流输电与柔性直流输电的技术优势。

[0051] 例如,如图1所示,输电系统包括整流侧的级联的高压阀组和低压阀组以及逆变侧的串联的高压阀组和低压阀组,送端(即整流侧)的级联换流阀以高压阀组和低压阀组的级联方式组成,低压阀组为三个换流器支路并联,高压阀组与低压阀组串联。其中,整流侧的高压阀组为第一换流器1,低压阀组包括三个并联的第二换流器2、第三换流器3、第四换流器4,第一换流器的交流侧与第二换流器的交流侧共同接入级联换流阀的第一交流端5,第三换流器的交流侧构成级联换流阀的第二交流端6,第四换流器的交流侧构成级联换流阀的第三交流端7。

[0052] 由于第一换流器的交流侧与第二换流器的交流侧共同接入级联换流阀的第一交流端,能够实现弱交流电网或新能源孤岛接入情况下第一换流器的换相支撑。由于第三换流器、第四换流器的交流侧分别连接第二交流端、第三交流端,可以实现不同规模能源系统的分层接入。由于第二交流端与第三交流端直接连接低压阀组换流器,避免了交流侧的多次升压汇集,减少变压器投资。

[0053] 图1中的整流侧高压阀组仅有一个换流器,即 $n$ 为1,而如图2所示的输电系统结构,级联换流阀的高压阀组与低压阀组分别由多个换流器并联组成。

[0054] 优选的,如图1所示,高压阀组并联换流器的个数 $n$ 为1,低压阀组并联换流器的个数 $m$ 为3。

[0055] 级联换流阀高压阀组的换流器个数不限于一个,低压阀组并联的换流器个数不限于三个。在本实施例所提分层结构的基础上,级联换流阀高压阀组和低压阀组的换流器个数可以根据能源基地的地理分布以及输送容量灵活调整。

[0056] 整流侧的级联换流阀中换流器既可以独立接入交流端,也可以多个换流器共同接入一个交流端,可根据实际交流端类型以及换流器类型确定。

[0057] 进一步,高压阀组和低压阀组的交流端为强交流电网、弱交流电网、新能源孤岛或以上三种组合接入。其中,强交流电网为系统短路比大于20的交流电网,弱交流电网即系统短路比小于6的交流电网。

[0058] 其中,新能源包括但不限于风能、太阳能,且新能源孤岛可以同时包含多种新能源。

[0059] 如图3所示的分层混联直流输电系统整流侧交流端,交流端既可以只包含一种交流系统,也可以是交流电网、风电孤岛和光伏基地的任意组合。组合方式有:交流电网+风电孤岛、交流电网+光伏基地、风电孤岛+光伏基地以及交流电网+风电孤岛+光伏基地。

[0060] 优选的,根据不同的交直流系统实际工况以及各换流器的工作特性,整流侧的级联换流阀中换流器可为电网换相换流器、半桥型模块化多电平换流器、全桥型模块化多电平换流器或混合型模块化多电平换流器,实现多种换流器组合。

[0061] 当送端(即整流侧)交流系统(即交流端)为弱交流电网或新能源孤岛时,需要建立稳定的交流电压,因此低压阀组可由具备为弱交流系统甚至无源系统供电能力的半桥型模块化多电平换流器组成。更进一步的,若需要低压阀组具备无闭锁故障穿越以及降压运行等能力,低压阀组可由全桥型模块化多电平换流器或混合型模块化多电平换流器组成。

[0062] 当送端交流系统为强交流电网时,为了降低建造成本,同时提升输送容量,级联换

流阀低压阀组可使用电网换相换流器。

[0063] 如图4所示的整流侧级联换流阀可以使用的电网换相换流器的结构,电网换相换流器采用12脉动晶闸管换相的结构。如图5所示的可以使用的模块化多电平换流器的结构,换流器各桥臂可采用半桥型子模块、全桥型子模块或半-全桥串联混合型子模块。其中,混合型模块化多电平换流器各个桥臂由75%的全桥子模块和25%的半桥子模块串联组成。其特征为存在能够输出负电压的子模块,可保证桥臂子模块电容电压维持额定的同时根据工况调整直流电压。

[0064] 优选的,输电系统的逆变侧包括高压阀组换流器和低压阀组换流器;该高压阀组换流器和低压阀组换流器串联后,与位于整流侧的级联换流阀直流侧并联。

[0065] 根据受端(即逆变侧)不同的交直流系统实际工况,以及各换流器的工作特性,受端高压阀组和低压阀组中的换流器可为电网换相换流器、半桥型模块化多电平换流器、全桥型模块化多电平换流器或混合型模块化多电平换流器,实现多种换流器组合。

[0066] 优选的,整流侧高压阀组并联有高压晶闸管和机械开关,且串联有高压晶闸管,用于旁路高压阀组;整流侧低压阀组各个支路上串联有低压晶闸管以及机械开关,用于旁路低压阀组中换流器;逆变侧的高压阀组与低压阀组均并联有晶闸管与机械开关,并串联有晶闸管。例如,如图1所示,10为逆变侧负荷中心1,11为逆变侧负荷中心2,12为整流侧串联高压晶闸管,13为整流侧高压阀组并联机械开关,14为整流侧并联高压晶闸管,15为第二换流器串联晶闸管,16为第二换流器串联机械开关,17为第三换流器串联机械开关,18为第三换流器串联晶闸管,19为第四换流器串联机械开关,20为第四换流器串联晶闸管,21为逆变侧串联高压晶闸管1,22为逆变侧高压阀组并联机械开关,23为逆变侧并联高压晶闸管,24为逆变侧串联高压晶闸管2,25为逆变侧串联低压晶闸管,26为逆变侧低压阀组并联机械开关,27为逆变侧并联低压晶闸管。

[0067] 通过切换输电系统中的高压晶闸管、低压晶闸管以及机械开关的状态,使得分层混联直流输电系统工作于分层级联工作模式或单层柔直工作模式。

[0068] 当系统中换流器因故障或检修而需要退出运行时,通过切换高压晶闸管、低压晶闸管以及机械开关的状态可使分层混联直流输电系统工作于分层级联工作模式或单层柔直工作模式。

[0069] 因此,本实施例提出的分层混联直流输电系统可以工作于多种模式下。如图6的上图所示,当需要对送端级联换流阀中某一低压阀组换流器进行检修时,可通过该低压阀组串联的晶闸管配合机械开关动作,旁路低压阀组换流器,分层混联直流输电系统工作在另一种分层级联工作模式下。

[0070] 如图6的下图所示为当需要对高压阀组换流器1进行检修时,可通过高压晶闸管配合机械开关动作,旁路高压阀组,分层混联直流输电系统的工作模式切换为单层柔直工作模式。具体的,需要对高压阀组进行检修时,可以通过向与整流侧高压阀组并联的整流侧并联高压晶闸管14施加触发信号,同时向与逆变侧高压阀组并联的逆变侧并联高压晶闸管23施加触发信号,将高压阀组旁路,使得高压阀组在不影响直流系统运行的情况下退出运行。系统切换为单层柔直工作模式。

[0071] 级联换流阀低压阀组各换流器设置有串联晶闸管,需要对低压阀组的各支路进行检修时,可通过交流端功率控制配合晶闸管和机械开关的作用,在不影响直流系统运行的

情况下退出换流器。

[0072] 如图1所示的输电系统,当低压阀组中第三换流器3退出运行时,首先将交流端6的功率控制为0,随后关断第三换流器串联晶闸管18并开断第三换流器串联机械开关17,将第三换流站3从系统中切除。

[0073] 进一步,以送端级联换流阀中低压阀组换流器4的退出和投入为例,设计换流器的投退方式为:系统接到阀组退出运行的指令后,将第三交流端7的功率指令值降为0,使得与换流器4相连的直流线路上的电流降为0。由于此时支路上的电流低于晶闸管维持电流,晶闸管20截止,待电路电流下降至0且晶闸管关断后,将换流器4闭锁,随后断开机械开关19,将换流器4从系统中切除且不影响其余换流器的正常工作。当需要使第四换流器4重新加入直流系统时,可先闭合第四换流器串联机械开关19,并给晶闸管20施加触发信号,随着第三交流系统给桥臂子模块电容充电,第四换流器4直流电压逐步升高,当其高于低压晶闸管20导通电压时,第四换流器串联晶闸管20导通,此时,换流器启动并重新加入直流系统。

[0074] 优选的,整流侧的级联换流阀的直流侧与逆变侧的高压阀组换流器的直流侧之间采用不对称正极接线方式、不对称负极接线方式或双极性接线方式。

[0075] 分层混联直流输电系统可采用不对称正极性接线形式,整流侧级联换流阀的高压阀组正极与受端第五换流器8(即逆变侧高压阀组换流器)正极通过直流输电线路相连,整流侧级联换流阀低压阀组和受端第六换流器9(即逆变侧低压阀组换流器)的负极分别接地。例如,如图7所示的分层混联直流输电系统,该直流输电系统采用不对称正极性接线形式。若第三交流端为强交流电网,级联换流阀低压阀组的第四换流器可由模块化多电平换流器更换为电网换相换流器。

[0076] 分层混联直流输电系统也可采用不对称负极性接线形式,其中整流侧级联换流阀的低压阀组负极与受端第六换流器负极通过直流输电线路相连,整流侧级联换流阀高压阀组和受端第五换流器的正极分别接地。例如,如图8所示的分层混联直流输电系统,该直流输电系统采用不对称负极性接线形式。送端级联换流阀的低压阀组负极与受端第六换流器负极通过直流输电线路相连,级联换流阀高压阀组和受端第五换流器的正极分别接地。该实施例混合型直流输电系统在正常运行时,接地极会流过较大电流,可额外设计接地极。

[0077] 分层混联直流输电系统也可采用双极性接线形式,整流侧级联换流阀的高压阀组正极与受端第五换流器正极通过直流输电线路相连,整流侧级联换流阀低压阀组和受端第六换流器的负极通过金属回线接地。例如,如图9所示的分层混联直流输电系统,该直流输电系统采用双极性接线形式。送端级联换流阀的高压阀组正极与受端第五换流器正极通过直流输电线路相连,级联换流阀低压阀组和受端第六换流器的负极通过金属回线接地。直流电流无需流经大地,而是经过图中金属回线构成回路从而避免了直流电流对沿线金属管道等其他民用设备的腐蚀。

[0078] 另外,如图10所示的分层混联直流输电系统,该实施例的直流输电系统采用不对称正极性接线形式。其次若第一交流端、第二交流端以及第三交流端均为强交流电网,级联换流阀低压阀组的第二换流器、第三换流器以及第四换流器可由模块化多电平换流器更换为电网换相换流器。如图11上图所示的分层混联直流输电系统,该实施例的直流输电系统采用不对称正极性接线形式,原受端高压阀组第五换流器由模块化多电平换流器更换为电网换相换流器。如图11下图所示的分层混联直流输电系统,该实施例的直流输电系统采用

不对称正极性接线形式,原受端高压阀组第五换流器和低压阀组第六换流器均由模块化多电平换流器更换为电网换相换流器。因此,本实施例提供的方案可根据不同的交直流系统实际工况以及各换流器的工作特性,灵活选择换流器类型。

[0079] 实施例二

[0080] 一种如上实施例一所述的分层混联直流输电系统的直流故障清除方法,控制分层混联直流输电系统中各换流器的配合执行,将整流侧与逆变侧的故障电流限制为0,完成直流故障的清除。优选的,当输电系统为图1所示的结构,且整流侧高压阀组中换流器为电网换相换流器、整流侧低压阀组中换流器为半桥型模块化多电平换流器,则故障清除方法包括:

[0081] 判断所述输电系统直流侧是否发生故障,闭锁所述输电系统中模块化多电平换流器,从而阻断子模块电容放电通路;高压阀组换流器由定直流电压控制切换为定触发角控制,通过强制移相实现该换流器输出负压,低压阀组各换流器输出电压仍为正,输电系统直流侧电压为零,抑制短路电流上升,高压阀组换流器切换为逆变状态同时阻断了第一、第二和第三交流端经低压阀组的放电通路,直流输电系统逆变侧利用高压晶闸管与低压晶闸管的单向导通特性阻断故障电流;故障点去游离过程完成后,控制分层混联直流输电系统重新启动,并解锁模块化多电平换流器,同时高压阀组换流器恢复定直流电压控制;触发逆变侧晶闸管组,使系统恢复正常功率传输。

[0082] 整流侧级联换流阀使用的全控型电力电子器件可以为绝缘门极双极型晶体管、集成门极换流晶闸管或门极可关断晶闸管。

[0083] 分层混联直流输电系统的直流输电线路可以采用直流电缆、架空线路、架空线路与电缆线路混合等形式。

[0084] 相关技术方案同实施例一,在此不再赘述。

[0085] 本领域的技术人员容易理解,以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

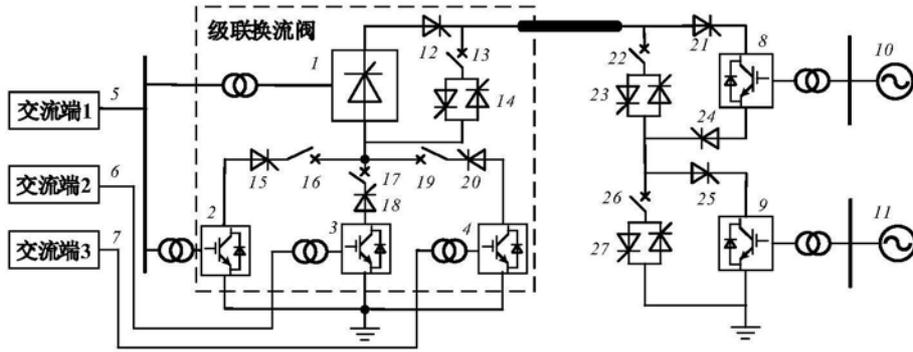


图1

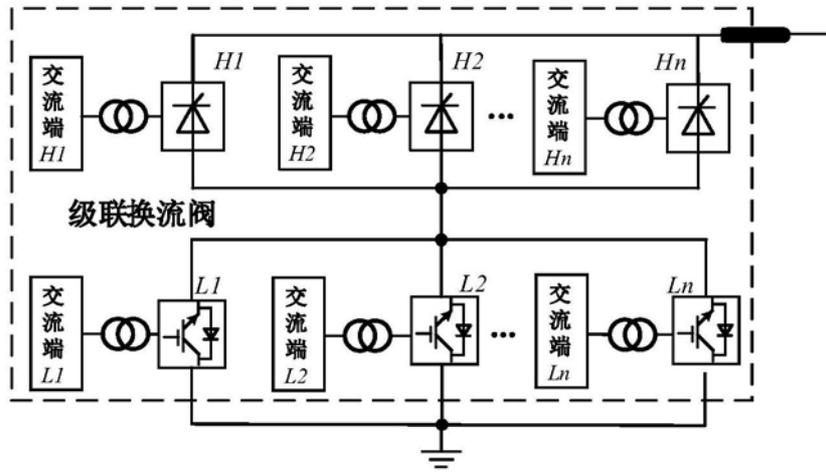


图2

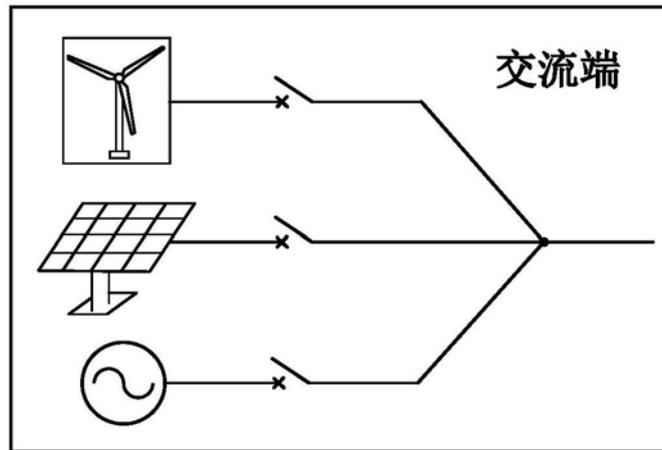


图3

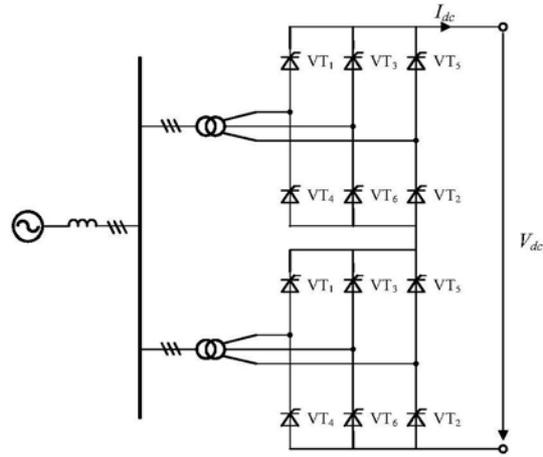


图4

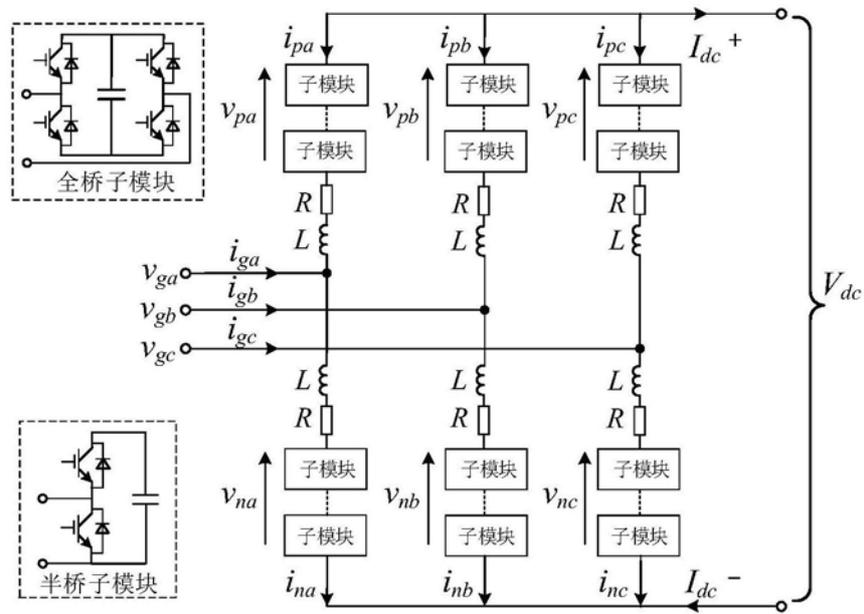


图5

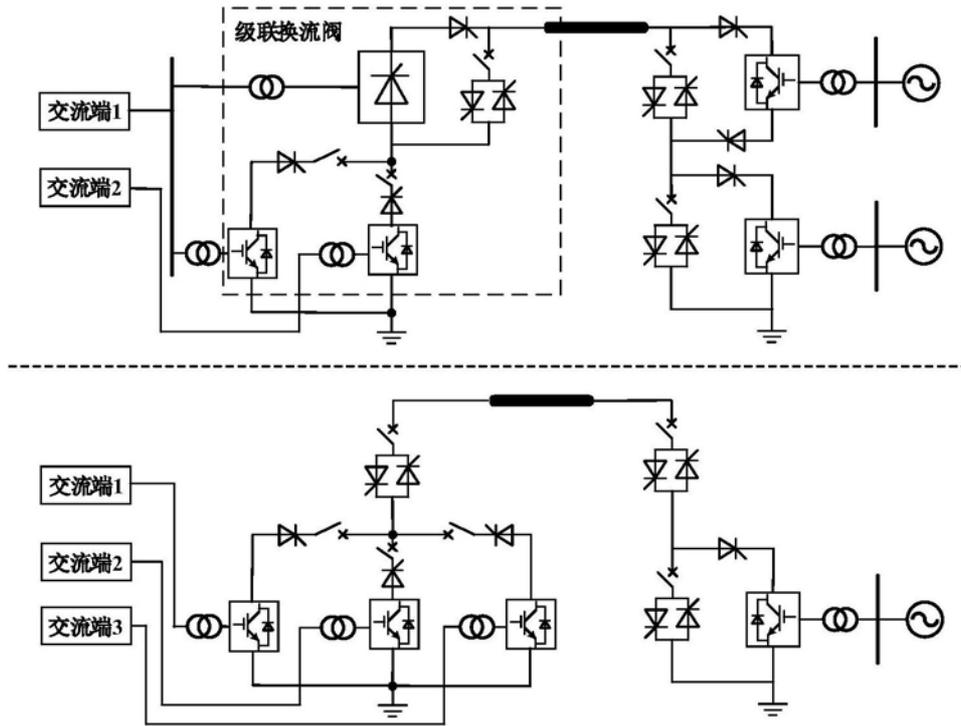


图6

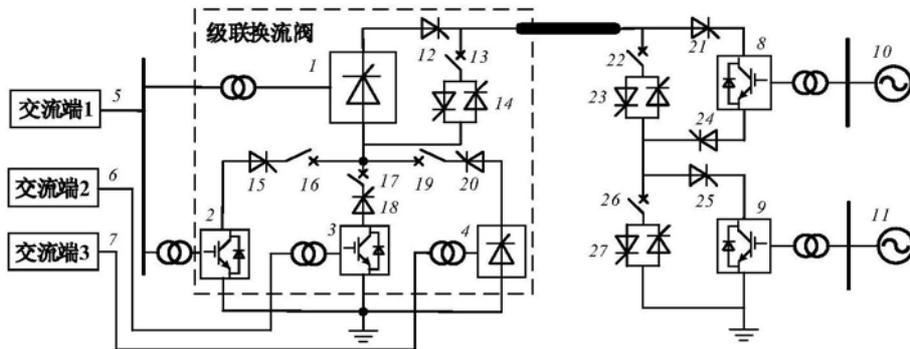


图7

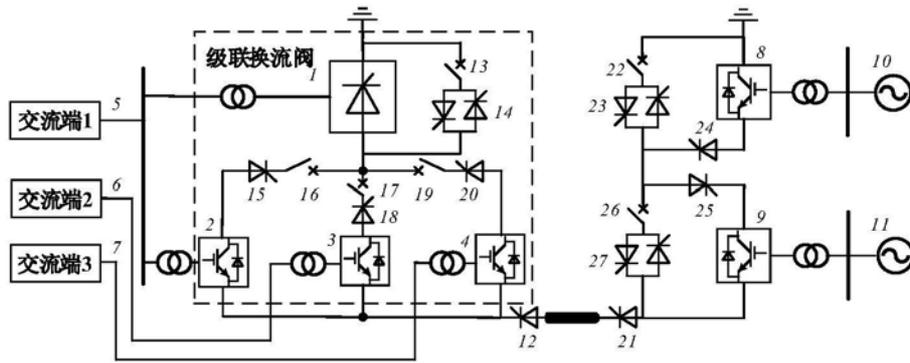


图8

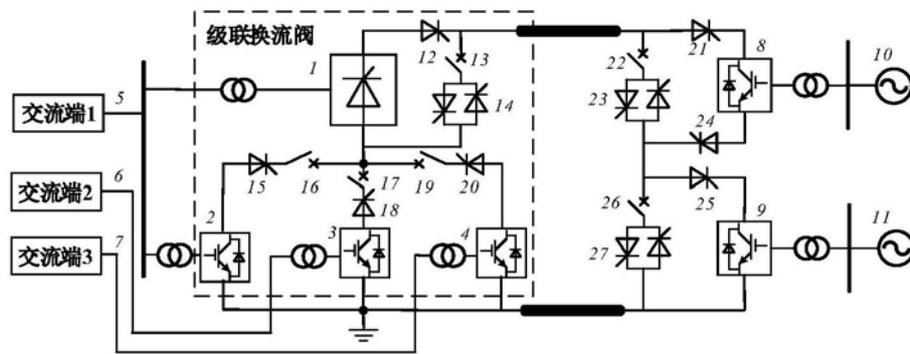


图9

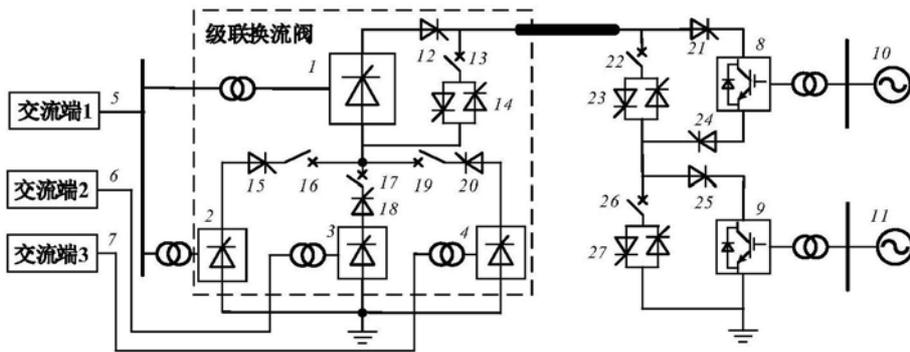


图10

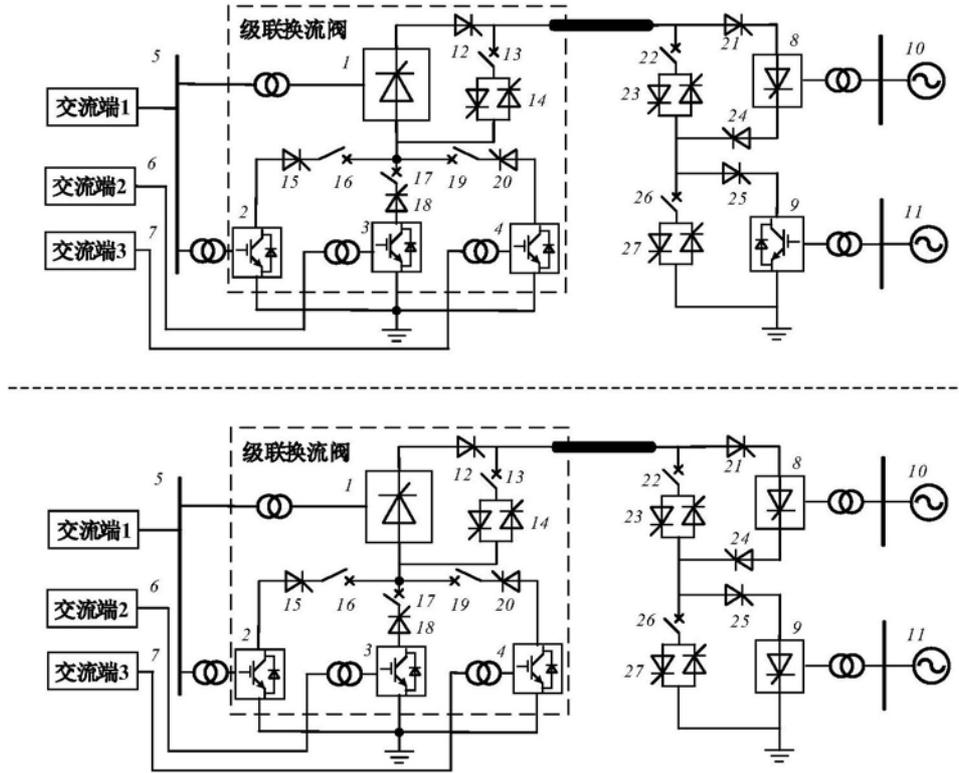


图11