



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107615431 B

(45)授权公告日 2019.11.12

(21)申请号 201580080654.2

苑春明 姚大伟 杨超

(22)申请日 2015.08.05

(74)专利代理机构 北京市金杜律师事务所
11256

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107615431 A

代理人 李辉

(43)申请公布日 2018.01.19

(51)Int.Cl.
H01H 9/54(2006.01)

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2017.12.04

(56)对比文件

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/CN2015/086099 2015.08.05

EP 2790285 A1,2014.10.15,
CN 103457257 A,2013.12.18,
CN 1617281 A,2005.05.18,
CN 103837827 A,2014.06.04,
CN 103681039 A,2014.03.26,

(87)PCT国际申请的公布数据
W02017/020269 EN 2017.02.09

审查员 钱玉萍

(73)专利权人 ABB瑞士股份有限公司
地址 瑞士巴登

(72)发明人 杨晓波 贝尔特·伯格达尔

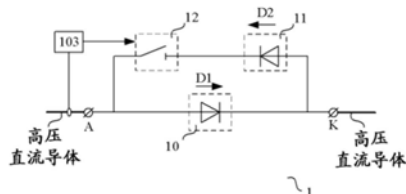
权利要求书2页 说明书9页 附图3页

(54)发明名称

双向功率阀及其控制方法和使用其的混合多端高压直流系统

(57)摘要

提供用于发生在高压直流导体中的电流的双向功率阀(1)、用于其的控制方法以及采用双向功率阀的混合多端高压直流系统。双向功率阀(1)包括第一导通方向(D1)的第一功率二极管布置(10),第二导通方向(D2)的第二功率二极管布置(11);与第二功率二极管(11)串联连接的机械隔离开关(12);其中:第一功率二极管布置(10)与串联连接的第二功率二极管布置(11)和机械隔离开关(12)并联连接;并且第一功率二极管布置(10)的第一导通方向(D1)与第二功率二极管布置(11)的第二导通方向(D2)彼此相反。可以以对开关事件定时精度更低要求来实现电流的换向和重换向,这使得机械隔离开关(12)和功率二极管的使用成为可能。因而这将导致成本和功率传输损耗显著降低。



1. 一种用于发生在高压直流导体中的电流的双向功率阀,包括:
第一导通方向的第一功率二极管布置;
第二导通方向的第二功率二极管布置;
与所述第二功率二极管布置串联连接的机械隔离开关;和
功率阀控制器,其适于响应于所述高压直流导体电流方向从所述第一导通方向换向到所述第二导通方向而控制所述机械隔离开关闭合;

其中:

所述第一功率二极管布置与串联连接的所述第二功率二极管布置和所述机械隔离开关并联连接;并且

所述第一功率二极管布置的所述第一导通方向与所述第二功率二极管布置的所述第二导通方向彼此相反。

2. 根据权利要求1所述的双向功率阀,其中:

所述第一功率二极管布置包括多个串联连接的第一功率二极管单元。

3. 根据权利要求2所述的双向功率阀,其中:

所述第二功率二极管布置包括第二功率二极管单元;并且

所述第二功率二极管单元的反向峰值电压基本上等于或者大于所述多个第一功率二极管单元的正向偏置电压之和,且小于所述正向偏置电压之和的预定倍数。

4. 根据权利要求1至3中任一权利要求所述的双向功率阀,其中:

所述功率阀控制器进一步适于响应于所述高压直流导体电流方向从所述第二导通方向换向到所述第一导通方向而控制所述机械隔离开关断开。

5. 根据权利要求4所述的双向功率阀,还包括:

电流传感器,所述电流传感器用于感测所述高压直流导体电流方向并且向所述功率阀控制器发送表示所述高压直流导体电流方向的信号;

其中:

当所述信号表明所述高压直流导体电流方向与所述第一功率二极管布置的所述第一导通方向一致时,所述机械隔离开关被控制成断开。

6. 一种混合多端高压直流系统,包括:

根据前述权利要求中任一项所述的用于发生在所述高压直流导体中的电流的双向功率阀;

基于LCC的整流器;

基于VSC的第一逆变器;以及

基于VSC的第二逆变器;

其中:

所述基于VSC的第一逆变器通过所述高压直流导体和所述双向功率阀连接到所述基于LCC的整流器和所述基于VSC的第二逆变器两者之一;并且

所述双向功率阀的所述第一功率二极管布置的所述第一导通方向指向所述基于VSC的第一逆变器。

7. 根据权利要求6所述的混合多端高压直流系统,还包括:

系统控制器,所述系统控制器适于控制闭锁/解锁所述基于LCC的整流器并且切换所述

基于VSC的第一逆变器以作为整流器工作。

8. 一种直流路径换向方法,包括:

(a) 正向偏置第一导通方向的第一功率二极管布置,同时将所述第一功率二极管布置两端的电压放置在串联连接的断开的机械隔离开关和第二导通方向的第二功率二极管布置的两端;

(b) 闭合所述机械隔离开关;以及

(c) 正向偏置所述第二功率二极管布置;

其中:

所述第一功率二极管布置的所述第一导通方向与所述第二功率二极管布置的所述第二导通方向彼此相反。

9. 根据权利要求8所述的直流路径换向方法,还包括在步骤(a)、(b)和(c)之后的步骤:

(d) 正向偏置所述第一功率二极管布置;以及

(e) 断开所述机械隔离开关。

10. 根据权利要求9所述的直流路径换向方法,其中:

所述步骤(e)在所述步骤(d)之后。

11. 一种用于操作混合多端高压直流系统的方法,包括:

(a) 正向偏置第一导通方向的第一功率二极管布置,同时将所述第一功率二极管布置两端的电压放置在串联连接的断开的机械隔离开关和第二导通方向的第二功率二极管布置的两端;

(b) 基于LCC的整流器通过所述第一功率二极管布置向基于VSC的第一逆变器提供功率;

(c) 闭合所述机械隔离开关;

(d) 闭锁所述基于LCC的整流器并且切换所述基于VSC的第一逆变器以作为整流器工作;以及

(e) 正向偏置所述第二功率二极管布置,并且作为整流器工作的所述基于VSC的第一逆变器通过所述闭合的机械隔离开关和所述第二功率二极管布置向基于VSC的第二逆变器提供功率;

其中:

所述第一功率二极管布置的所述第一导通方向与所述第二功率二极管布置的所述第二导通方向彼此相反。

12. 根据权利要求11所述的方法,还包括在步骤(a)至(e)之后的步骤:

(f) 对所述基于LCC的整流器解锁并且切换所述基于VSC的第一逆变器以作为逆变器工作;

(g) 正向偏置所述第一功率二极管布置;以及

(h) 断开所述机械隔离开关。

13. 根据权利要求12所述的方法,其中:

所述步骤(h)在所述步骤(g)之后。

双向功率阀及其控制方法和使用其的混合多端高压直流系统

技术领域

[0001] 本发明涉及一种功率阀,更具体地涉及一种双向功率阀、其控制方法、以及采用双向功率阀的混合多端高压直流系统(HVDC)。

背景技术

[0002] 已知功率二极管可以用于高压直流(HVDC)系统,以允许直流电流通过直流(DC)输电线在一个方向上传递到逆变器,且阻断在相反方向上的直流电流。阻断在相反方向上的直流电流对去除发生在直流输电线上的故障电流很重要,故障电流通常为短路接地的结果。

[0003] 在论文“A LCC and MMC hybrid HVDC topology with DC line fault clearance capability”,Geng Tang and Zheng Xu,Volume 62,November 2014, International Journal of Electrical Power&Energy Systems中描述这种功率二极管布置。论文提出了一种混合多端HVDC系统(混合MTDC系统),其中整流器采用电网换相变流器(LCC)且逆变器采用两个电压源变流器(VSC)。系统提供直流输电线故障消除能力,适合于大功率传输。用安装在靠近逆变器处架空线(直流输电线)上的功率二极管可以实现对直流输电线故障的弹性。直流输电线故障的仿真结果确认了所安装的功率二极管可阻断故障电流路径的可行性。由于在VSC之间放置了功率二极管,在两个VSC之间不可能完成功率支撑,因而混合MTDC系统的灵活性下降。

[0004] 针对功率二极管可能需要旁路电路,用于在反向偏置的功率二极管处在相反方向上旁路直流电流。旁路电路和功率二极管组成了一个双向功率阀。专利EP 2790285公开了电路拓扑的一个示例。具体地,考虑到其关于图1的描述,教导了一种双向功率阀(双向开关),双向功率阀由一对反向平行连接的晶闸管组成,晶闸管中的第一晶闸管用作到晶闸管中的第二晶闸管的旁路电路,并且能够导通相对于第二晶闸管在相反方向上旁路直流电流。技术人员应当明白,当第二晶闸管用导通方向相同的功率二极管代替时,第一晶闸管也可以旁路反向的直流电流而操作。

[0005] 尽管这类三端功率半导体设备(例如晶闸管、IGBT等)几乎瞬时响应控制要求,但是它们也带来了相对成本高的缺点,并且当直流电流流过三端功率半导体设备时也有传输损耗。

[0006] 与晶闸管相比,二极管由于制造简单且不需要控制而具有明显低的成本。尽管二极管不可以控制电气导通,但它可以阻断来自一个方向上的电流。此外,二极管的功率损耗部分少于晶体管的功率损耗。机械隔离开关具有比上述两种半导体设备明显低的功率损耗和成本。除此之外,机械隔离开关也具有导通和关断功能,尽管动作不能在电流流过时实施。

发明内容

[0007] 根据本发明的一个方面,提供用于发生在高压直流导体中的电流的双向功率阀,

双向功率阀包括：第一导通方向的第一功率二极管布置；第二导通方向的第二功率二极管布置；与第二功率二极管布置串联连接的机械隔离开关；其中：第一功率二极管布置与串联连接的第二功率二极管布置和机械隔离开关并联连接；并且第一功率二极管布置的第一导通方向与第二功率二极管布置的第二导通方向彼此相反。

[0008] 根据本发明的另一个方面，提供了一种直流路径换向方法，包括：(a) 正向偏置第一导通方向的第一功率二极管布置，同时将第一功率二极管布置两端的电压放置在串联连接的断开的机械隔离开关和第二导通方向的第二功率二极管布置的两端；(b) 闭合机械隔离开关；(c) 正向偏置第二功率二极管布置；其中：第一功率二极管布置的第一导通方向与第二功率二极管布置的第二导通方向彼此相反。

[0009] 通过使用双向功率阀和直流路径换向方法，第一功率二极管布置可以被正向偏置，并且第一功率二极管布置的内置电势施加在串联连接的第二功率二极管布置和机械隔离开关上。由于并联连接，第二功率二极管布置被反向偏置。在从第一功率二极管布置换向到串联连接的第二功率二极管布置和机械隔离开关发生之前，机械隔离开关将闭合。由于第一功率二极管布置和第二功率二极管布置的反并联连接，当第一功率二极管布置正向偏置导通电流时，机械隔离开关可以闭合。因此机械隔离开关闭合的时机可以设定在电流反向之前的一段时间内。考虑到机械隔离开关在收到命令其闭合的外部控制信号之后将花费几毫秒(ms)来闭合，外部控制信号可以只要在电流反向前几ms之前发出。随后，第二功率二极管布置在电流方向改变时正向偏置，并且电流从第一功率二极管布置换向到串联连接的第二功率二极管布置和机械隔离开关。在重换向中，第一功率二极管布置正向偏置并且因此机械隔离开关在零电流时断开，将第二功率二极管布置的电流换向到第一功率二极管布置。可以以对开关事件定时精度更低要求来实现电流的换向和重换向，这使得机械隔离开关和功率二极管的使用成为可能。因而这将导致成本和功率传输损耗显著降低。

[0010] 根据本发明的另一个方面，提供了一种混合多端高压直流系统，包括：由上文提到的用于发生在高压直流导体中的电流的双向功率阀；基于LCC的整流器；基于VSC的第一逆变器；以及基于VSC的第二逆变器；其中：基于VSC的第一逆变器通过高压直流导体和双向功率阀连接到基于LCC的整流器和基于VSC的第二逆变器两者之一；并且双向功率阀的第一功率二极管布置的第一导通方向指向基于VSC的第一逆变器。

[0011] 根据本发明的另一个方面，第一功率二极管布置包括多个串联连接的第一功率二极管单元，第二功率二极管布置包括第二功率二极管单元，并且第二功率二极管单元的反向峰值电压基本上等于或者大于多个第一功率二极管单元的正向偏置电压之和，且小于正向偏置电压之和的预定倍数。由于第二功率二极管布置的直流电压被第一功率二极管布置钳制，在机械断路器断开期间第二功率二极管布置上的电压应力应相对较小。因此，当设计双向功率阀时，可以以相对低的额定值来选择第二功率二极管布置的相关参数。

[0012] 根据本发明的另一个方面，提供了一种用于操作混合多端高压直流系统的方法，包括：(a) 正向偏置第一导通方向的第一功率二极管布置，同时将第一功率二极管布置两端的电压放置在串联连接的断开的机械隔离开关和第二导通方向的第二功率二极管布置的两端；(b) 基于LCC的整流器通过第一功率二极管布置向基于VSC的第一逆变器提供功率；(c) 闭合机械隔离开关；(d) 闭锁基于LCC的整流器并且切换基于VSC的第一逆变器作为整流器工作；以及(e) 正向偏置第二功率二极管布置，并且作为整流器工作的基于VSC的第一逆

变器通过闭合的机械隔离开关和第二功率二极管布置向基于VSC的第二逆变器提供功率；其中：第一功率二极管布置的第一导通方向与第二功率二极管布置的第二导通方向彼此相反。

[0013] 通过在混合MTDC系统使用双向功率阀和操作混合MTDC系统的方法，基于VSC的逆变器能够在基于LCC的整流器被闭锁期间，支撑在基于VSC的逆变器之间的功率传输。作为整流器工作的基于VSC的第一逆变器通过安装在自身附近的双向功率阀的串联连接的闭合的机械隔离开关和第二功率二极管布置，向基于VSC的第二逆变器提供直流功率。这使得在混合MTDC系统内实现VSC的轻松并网功率反转成为可能，并且仍然用功率阀维持了有价值的直流故障消除能力。

附图说明

[0014] 将参照附图中所示出的优选示例实施例，在下文中更详细地解释本发明的主题，其中：

[0015] 图1示出根据本发明的一个实施例用于发生在高压直流导体中的电流的双向功率阀；

[0016] 图2A、图2B和图2C示出根据图1的双向功率阀的换向操作；

[0017] 图3A、图3B和图3C示出根据图1的双向功率阀的换向操作；以及

[0018] 图4示出使用根据图1的双向功率阀的混合MTDC系统。

[0019] 在附图中使用的附图标记以及它们的含义以简要形式列于附图标记列表内。原则上，相同的部件在附图中提供有相同的附图标记。

具体实施方式

[0020] 在下文描述中，为了解释而非限制的目的，叙述了特定细节，例如具体的电路、电路元件、接口、技术等，以提供对本发明的全面理解。然而，对本领域的技术人员显而易见的是，本发明可以在与这些特定细节不同的其他实施例中实行。在其他情形中，略去了众所周知的方法以及编程过程、设备和电路的具体描述，以避免用不必要的细节使本发明的描述不清楚。

[0021] 图1示出根据本发明的一个实施例用于发生在高压直流导体中的电流的双向功率阀。如图1所示，双向功率阀1包括第一功率二极管布置10、第二功率二极管布置11以及机械隔离开关12。双向功率阀1与高压直流导体连接，以控制在导体上的流动的电流。

[0022] 第一功率二极管布置10可以有一个第一功率二极管单元或者串联连接多个第一功率二极管单元，以用作为单一半导体开关，并且配置成允许电流以第一导通方向D1（第一功率二极管的正向）通过第一功率二极管。第二功率二极管布置11可以有一个第二功率二极管单元或者串联连接多个第二功率二极管单元，以用作为单一半导体开关，并且同样配置成允许电流以第二导通方向D2（第二功率二极管的正向）通过第二功率二极管。机械隔离开关12可以是直流机械隔离开关，其操作由外部控制信号控制。与断路器不同，机械隔离开关缺少当载有大电流的导体被电气中断时抑制电弧发生的机构。第二功率二极管布置11和机械隔离开关12串联连接，并且配置成阻断与第二导通方向相反的方向上的电流并且遵循外部控制信号而断开/闭合电流路径。

[0023] 第一功率二极管布置10以及串联连接的第二功率二极管布置11和机械隔离开关12跨连接点A、K并联连接,并且第一功率二极管布置10的第一导通方向D1布置成与第二功率二极管布置11的第二导通方向D2相反。

[0024] 通过使用双向功率阀1,在电流从点A流向点K的情况下,第一功率二极管布置10可以正向偏置,并且第一功率二极管布置10的内置电势施加在串联连接的第二功率二极管布置11和机械隔离开关12上。在这种情形下,电流以第一导通方向D1流过第一功率二极管布置10。由于上文已描述的并联连接,第二功率二极管布置11反向偏置。为避免不需要的电流方向反转,例如电流由于高压直流导体接地短路而从K向A方向流动,机械隔离开关12保持断开。技术人员应当明白,在某些情形下,电力系统中的电流将需要从A到K方向改变为从K到A方向。在电流方向的改变发生之前,机械隔离开关将闭合。由于第一功率二极管布置10和第二功率二极管布置11的反并联连接,当第一功率二极管布置10正向偏置导通电流时机械隔离开关可以闭合。因此,机械隔离开关12闭合的时机可以设定在电流反向之前的一段时间内。考虑到机械隔离开关12在收到使其闭合命令的外部控制信号之后将花费几ms来闭合,该外部控制信号可以只要在电流反向前几ms之前发出。随后,第二功率二极管布置11在电流方向改变时正向偏置,并且电流从第一功率二极管布置10换向到串联连接的第二功率二极管布置11和机械隔离开关12。在电流方向从K到A变回A到K时发生重换向。第一功率二极管布置10布置被正向偏置并且因此机械隔离开关12在零电流时断开,将第二功率二极管布置11的电流换向到第一功率二极管布置10。

[0025] 可以以对开关事件定时精度更低要求来实现电流的换向和重换向,这使得机械隔离开关和功率二极管的使用成为可能。因而这将导致成本和功率传输损耗显著降低。

[0026] 作为备选,串联连接的第二功率二极管布置11和机械隔离开关12可以被断路器取代。

[0027] 响应于高压直流导体电流方向从第二导通方向换向到第一导通方向,功率阀控制器13可以向机械隔离开关12发送控制信号以断开机械隔离开关。电流传感器14可以感测高压直流导体电流方向并且发送表示高压直流导体电流方向的信号到功率阀控制器13。在信号表明高压直流导体电流方向与第一功率二极管布置10的第一导通方向D1一致时,控制机械隔离开关12断开。响应于高压直流导体电流方向从第一导通方向D1换向到第二导通方向D2,功率阀控制器13可以进一步地控制闭合机械隔离开关12。

[0028] 图2A、图2B和图2C示出根据图1的双向功率阀的换向操作。就如下实施例来描述,其中第一功率二极管布置10包括多个串联连接的第一功率二极管单元100、101...10m,并且第二功率二极管布置11包括一个第二功率二极管单元110。

[0029] 如图2A所示,第一导通方向D1的第一功率二极管布置10正向偏置,同时将第一功率二极管布置10两端的电压放置在串联连接的断开的机械隔离开关12和第二导通方向D2的第二功率二极管布置12的两端。直流电流流过第一功率二极管布置10的方向如箭头表示。

[0030] 如图2B所示,当需要功率潮流反转操作时,闭合需求发送到机械隔离开关12,因此机械隔离开关闭合。如箭头所示,电流维持通过第一功率二极管布置11导通。如图2C所示,在电流降至零并改变其方向后,第一功率二极管布置10反向偏置并且串联连接的第二功率二极管布置11和闭合的机械隔离开关12将开始导通,且电流流动方向反转。第二功率二极

管布置11正向偏置。

[0031] 图3A、图3B和图3C示出根据图1的双向功率阀的换向操作。用如下实施例来描述，其中第一功率二极管布置10包括多个串联连接的第一功率二极管单元100、101…10m，并且第二功率二极管布置11包括一个第二功率二极管单元110。

[0032] 如图3A所示，双向功率阀1工作于电流流动反向模式下并且电流(如箭头所示)流过机械隔离开关12和第二功率二极管布置11。如图3B所示，在电流方向改变后，电流将流过第一功率二极管布置10(如箭头所示)，因而第一功率二极管布置正向偏置。如图3C所示，当电流流动返回正常模式时，开关断开命令将发送到机械隔离开关12，以断开通过串联连接的第二功率二极管布置11和机械隔离开关12的电流路径。由于第二功率二极管布置11的直流电压被第一功率二极管布置10所钳制，在断开机械隔离开关12期间第二功率二极管布置11上的电压应力应相对较小。除此之外，在断开操作期间，机械隔离开关12上几乎没有电流应力，因为在断开机械隔离开关12之前电流已经降到零。因此，当设计双向功率阀时，可以以相对低的额定值来选择其部件的相关参数，这将在下文中的示例中解释。

[0033] 双向功率阀的元件设计

[0034] 为了解释阀的设计，作为示例，在三端混合MTDC系统上运用设计，系统有一个作为整流器的LCC(电网换相变流器)以及两个作为逆变器的VSC(电压源变流器)。在本应用中，阀分别装备在每一个VSC直流侧的直流线路上，如图4所示。

[0035] 假设混合MTDC系统为400kV/800MW单极直流系统。作为整流器的LCC控制直流电压，其额定直流线电压(U_{dLRN})为

[0036] $U_{dLRN} = 400\text{kV}$

[0037] LCC的额定直流电流(I_{dRN})为

[0038] $I_{dRN} = 2\text{kA}$

[0039] 在LCC与每个VSC之间，使用具有特定长度的输电线。在输电线上的电压降落假设为7kV。因此，每个VSC的额定直流线电压(U_{dLIN})为

[0040] $U_{dLIN} = 393\text{kV}$

[0041] 由于两个VSC容量相等，每个VSC的额定直流电流(I_{dIN})为

[0042] $I_{dIN} = 1\text{kA}$

[0043] 1) 第一功率二极管布置

[0044] 根据上文分析，图1中示出的第一功率二极管布置10在大多数运行时间下负责功率流动路径。

[0045] 电压应力和电流应力

[0046] 在最坏情况下，第一功率二极管布置10将承受高压直流导体的全部直流电压，例如当混合MTDC系统的直流输电线上有直流故障时的直流电压。在正常工作期间，流过第一功率二极管布置10的直流电流与流过混合MTDC系统的LCC整流器和VSC逆变器的直流电流相同。因此第一功率二极管布置10的额定电压(U_{diodeN})可以定义为

[0047] $U_{diodeN} = U_{dLIN} = 393\text{kV}$

[0048] 第一功率二极管布置10的额定电流(I_{diodeN})可以定义为

[0049] $I_{diodeN} = I_{dLIN} = 1\text{kA}$

[0050] 第一功率二极管布置的第一功率二极管单元100、101…10m的数量

[0051] 串联连接的第一功率二极管单元数量可以计算如下：

$$[0052] \quad n_s = k_s * \frac{U_{dLIN}}{V_{RRM}}$$

[0053] 其中 n_s 为第一功率二极管单元的数量， U_{dLIN} 为VSC逆变器的额定直流电压， V_{RRM} 为第一功率二极管单元的最大反向重复峰值电压， k_s 为考虑到冗余的系数。

[0054] 在第一功率二极管布置设计中选用普通恢复二极管单元(5SDD10F6000型)。第一功率二极管单元的关键参数列出如下：

[0055] $V_{RRM}=6000V$ (反向重复峰值电压)

[0056] $I_{FAVm}=1363A$ (平均正向电流)

[0057] $I_{FSM}=17500A$ (非重复峰值浪涌电流)

[0058] $V_{T0}=1.015V$ (阈值电压)

[0059] $R_T=0.407m\Omega$ (导通电阻)

[0060] 考虑 $k_s=2$ 用作冗余，计算出第一功率二极管单元的总数量(n_{s_Dm})：

$$[0061] \quad n_{s_Dm} = k_s * \frac{U_{dLIN}}{V_{RRM}} = 2 * \frac{393}{6} = 131$$

[0062] 第一功率二极管布置的功率损耗

[0063] 第一功率二极管布置在正常工作期间的导通损耗计算如下：

$$[0064] \quad P_{diode} = n_s * (I_{dIN} * V_{T0} + I_{dIN}^2 * R_T)$$

[0065] 其中 R_T 是第一功率二极管单元的导通电阻。

[0066] 这给出

$$[0067] \quad \begin{aligned} P_{diode_Dm} &= n_{s_Dm} * (I_{dIN} * V_{T0} + I_{dIN}^2 * R_T) \\ &= 131 * (1 * 1.015 + 1^2 * 0.407) = 186kW \end{aligned}$$

[0068] 其中 P_{diode_Dm} 是第一功率二极管布置的导通损耗。

[0069] 2) 第二功率二极管布置

[0070] 电压应力

[0071] 机械隔离开关12在直流故障期间将第二功率二极管布置11与第一功率二极管布置10两端的主电压隔离。因此，第二功率二极管布置所需的额定电压显著降低。

[0072] 在图3B的阶段，线电流从串联连接的第二功率二极管布置11和机械隔离开关12成功换向到第一功率二极管布置10，需要第二功率二极管布置11的额定电压超过第一功率二极管布置10的导通电压。第二功率二极管布置(U_{diode_Da})的电压应力可以定义为：

$$[0073] \quad U_{diode_Da} = n_{s_Dm} * V_{T0} = 131 * 1.015 = 133V$$

[0074] 电流应力

[0075] 如图2B所示，在旁路阶段期间，电流流过第二功率二极管布置。因此，第二功率二极管布置的电流应力(I_{diode_Da})可以定义为：

$$[0076] \quad I_{diode_Da} = I_{dIN} = 1kA$$

[0077] 第二功率二极管单元的数量

[0078] 用于第二功率二极管布置的串联连接的第二功率二极管单元的数量(n_{s_Da})可以

计算如下：

$$[0079] \quad n_{s_Da} = k_s * \frac{U_{diode_Da}}{V_{RRM}} = 1 * \frac{133}{6000} = 1$$

[0080] 其中用作冗余的 $k_s=1$ ，因为第二功率二极管的电压应力与5SDD10F6000类型的二极管的额定电压有大的电压差。

[0081] 如图2B所示，旁路工作期间第二功率二极管布置的功率损耗 (P_{diode_Da}) 计算如下：

$$[0082] \quad \begin{aligned} P_{diode_Dm} &= n_{s_Dm} * (I_{dIN} * V_{T0} + I_{dIN}^2 * R_T) \\ &= 1 * (1 * 1.015 + 1^2 * 0.407) = 1.422kW \end{aligned}$$

[0083] 在800MW系统中，1.4kW的功率损耗可以近似忽略。

[0084] 3) 机械隔离开关

[0085] 机械隔离开关12的电压应力 (U_{sN}) 和电流应力 (I_{sN}) 可以定义为：

$$[0086] \quad U_{sN} = U_{dLIN} = 393kV$$

$$[0087] \quad I_{sN} = I_{dIN} = 1kA$$

[0088] 并且机械隔离开关不需要用于电流断路功能。

[0089] 机械隔离开关12同样为低成本解决方案，因为不需要高速开关。因此可以在这里采用传统交流断路器。

[0090] 4) 总成本和总功率损耗

[0091] 设备仅采用低成本的二极管单元和机械隔离开关。并且仅有一个用于机械隔离开关的控制信号。因此，设备成本显著低于直流断路器 (DCCB) 的成本。设备的功率损耗也十分低。在800MW混合三端MTDC系统的示例中，设备的总功率损耗仅为正常工作期间其名义直流功率的一小部分，即约为 $2 \times 186kW / 800MW \times 100\% = 0.047\%$ 。进一步地，旁路工作期间的功率损耗可以忽略。

[0092] 根据图1的用于高压直流导体的双向功率阀可以用作代替在论文“A LCC and MMC hybrid HVDC topology with DC line fault clearance capability”中讨论的、安装在VSC逆变器附近高压直流导体上的功率二极管。这使得满足VSC之间功率支撑的需要(例如LCC整流器故障所带来的)成为可能。

[0093] 图4示出使用根据图1的双向功率阀的混合MTDC系统。如图4所示，混合MTDC系统包括作为整流器工作的LCC 40、作为逆变器工作的第一VSC 41以及作为逆变器工作的第二VSC 42。基于VSC的第一逆变器41通过高压直流导体43和根据图1的双向功率阀44连接到基于LCC的整流器和基于VSC的第二逆变器两者之一，以使得基于LCC的整流器40可以向基于VSC的第一逆变器41提供直流电。例如，双向功率阀44的K点通过高压直流导体43的一部分连接到基于VSC的第一逆变器41，用于向后者导通电流，并且双向功率阀44的A点通过高压直流导体43的另外一部分连接到基于LCC的整流器40，用于提供潜在电流路径，基于VSC的第一逆变器41可以通过该点向基于VSC的第二逆变器42提供电流，其中基于VSC的第一逆变器41已经被切换到整流器工作模式。并且，如果基于VSC的第二逆变器42考虑向基于VSC的第一逆变器41提供功率，优选地，另一个根据图1的双向功率阀46布置成连接到基于VSC的第二逆变器42；否则，双向功率阀46可以用功率二极管来代替。基于VSC的第二逆变器42通过高压直流导体45和根据图1的双向功率阀46连接到基于LCC的整流器和基于VSC的第一逆

变器两者之一,以使得基于LCC的整流器40可以向基于VSC的第二逆变器42提供直流电。例如,双向功率阀46的K点通过高压直流导体45的一部分连接到基于VSC的第二逆变器42,用于向后者导通电流,并且双向功率阀46的A点通过高压直流导体45的另外一部分连接到基于LCC的整流器40,用于提供潜在路径,基于VSC的第二逆变器42可以通过该点向基于VSC的第一逆变器41提供电流,其中基于VSC的第二逆变器42已经被切换到整流器工作模式。双向功率阀44的A点和双向功率阀46的A点通过高压直流导体43的一部分和高压直流导体45的一部分互相连接。双向功率阀1的第一功率二极管布置10的第一导通方向D1指向基于VSC的第一逆变器41,配置成阻断从基于VSC的第一逆变器41通过高压直流导体43接地的故障电流路径。关于优选的实施例,另一个双向功率阀1的第一功率二极管布置10的第一导通方向D1指向基于VSC的第一逆变器42。

[0094] 在混合MTDC系统4中,基于LCC的整流器40在系统4中具有最大的容量。因此,基于LCC的整流器被采用为直流电压控制终端。基于VSC的第一逆变器41和基于VSC的第二逆变器42分别控制它们自己的功率。与论文“A LCC and MMC hybrid HVDC topology with DC line fault clearance capability”所公开的类似,由于双向功率阀44和46的第一功率二极管布置反向偏置,直流输电线故障将不会引起来自基于VSC的第一逆变器41和基于VSC的第二逆变器42处的放电电流。

[0095] 在正常工作中,双向功率阀44的第一功率二极管布置正向偏置,同时将第一功率二极管布置两端的电压放置在串联连接的双向功率阀44的断开的机械隔离开关和第二功率二极管布置的两端。基于LCC的整流器40通过双向功率阀44的第一功率二极管布置向基于VSC的第一逆变器41提供电流。

[0096] 通常由于高压直流导体短路接地故障或者其自身故障的结果,当基于LCC的整流器40受到系统控制器48的控制而被闭锁时,系统控制器48可以向双向功率阀44的功率阀控制器发送信息。相应地,双向功率阀44的机械隔离开关被双向功率阀44的功率阀控制器控制而闭合。系统控制器48控制基于VSC的第一逆变器41切换为整流器工作。双向功率阀44的第二功率二极管布置正向偏置,并且作为整流器工作的基于VSC的第一逆变器41通过双向功率阀44的闭合的机械隔离开关和第二功率二极管布置向基于VSC的第二逆变器42提供功率。

[0097] 如果故障被消除并且混合MTDC系统要切换回正常工作,基于LCC的整流器40被系统控制器48解锁以向基于VSC的第一和第二逆变器41,42提供功率。系统控制器48控制基于VSC的第一逆变器41切换回逆变器工作。双向功率阀44的第一功率二极管布置被基于LCC的整流器40正向偏置。然后受双向功率阀44的功率阀控制器的控制,双向功率阀44的机械隔离开关断开。

[0098] 技术人员应当明白,开关47可以放置于高压直流导体43,45的结合点J附近的直流输电线上,因此当基于VSC的逆变器切换作为整流器工作时,例如基于VSC的第一逆变器作为整流器工作,开关47可以断开,使得由基于VSC的第一逆变器41提供的电流被限制到基于VSC的第二逆变器42方向。

[0099] 通过用双向功率阀代替单向导通的功率二极管,在基于LCC的整流器被闭锁期间,基于VSC的逆变器能够支撑它们之间的功率。这使得在混合MTDC系统内实现VSC的轻松并网功率反转成为可能,并且仍然用功率阀维持了有价值的直流故障消除能力。

[0100] 尽管根据一些优选实施例描述了本发明,本领域的技术人员应当明白这些实施例不能限制本发明的范围。在不偏离本发明精神和概念的情况下,任何对实施例的变化和修改应当在具有本领域一般知识、技术的人员的理解之内,并且因此落入由所附权利要求所限定的本发明的范围之内。

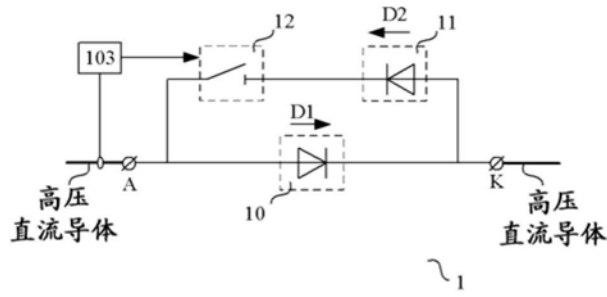


图1

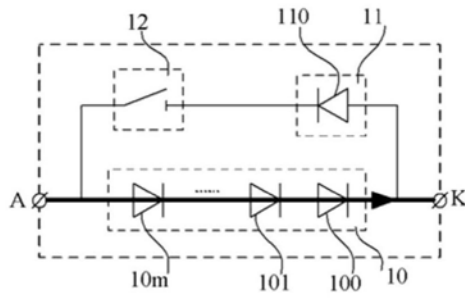


图2A

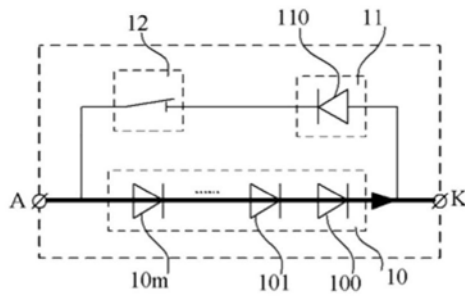


图2B

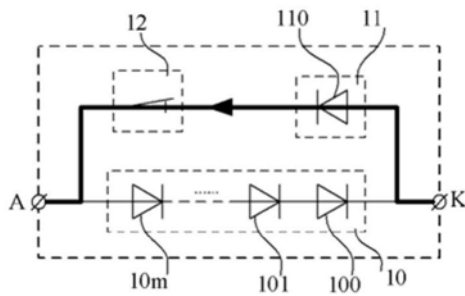


图2C

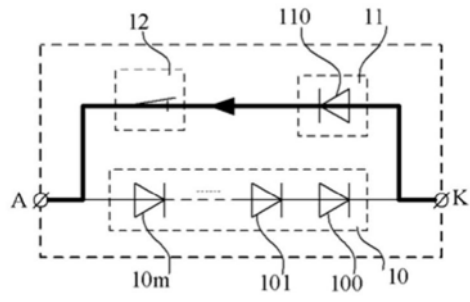


图3A

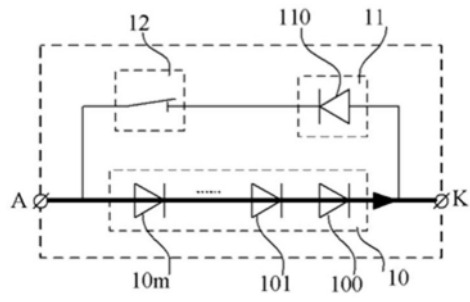


图3B

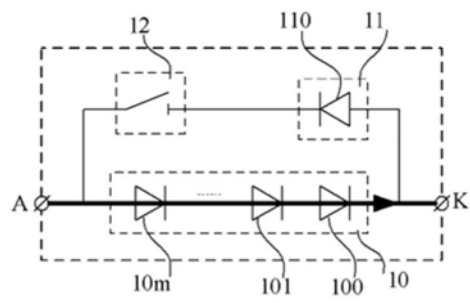


图3C

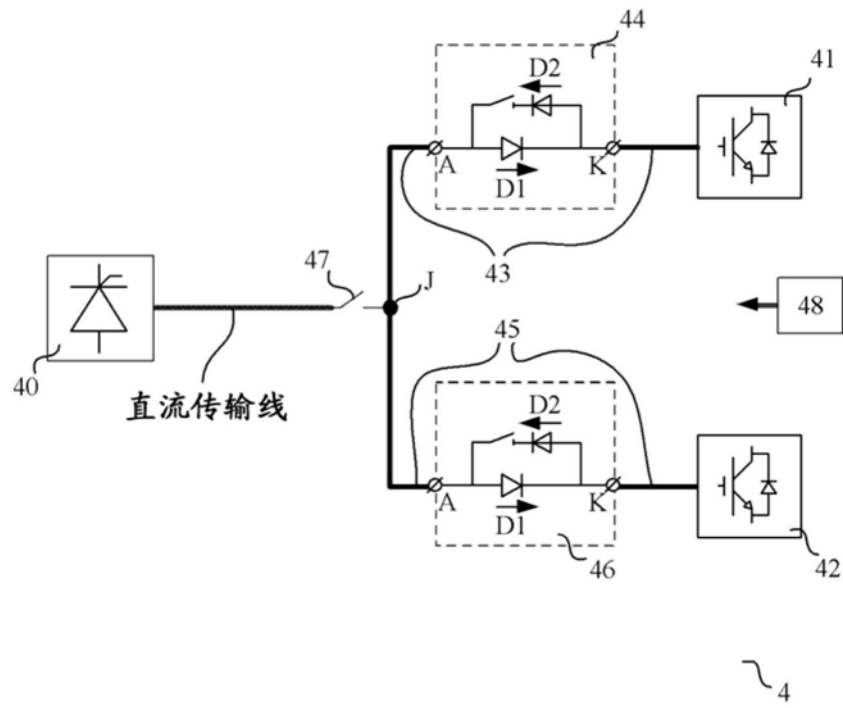


图4