



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102969732 B

(45) 授权公告日 2015.06.17

(21) 申请号 201210431652.1

(22) 申请日 2012.11.01

(73) 专利权人 浙江大学

地址 310027 浙江省杭州市西湖区浙大路
38号

(72) 发明人 徐政 唐庚 薛英林

(74) 专利代理机构 杭州天勤知识产权代理有限公司 33224

代理人 胡红娟

(51) Int. Cl.

H02J 3/36(2006.01)

(56) 对比文件

CN 102231520 A, 2011.11.02, 说明书第
10-25段以及说明书附图1-3.

EP 0554804 B1, 1993.01.29, 全文.

管敏渊等. 模块化多电平换流器子模块故障特性和冗余保护. 《电力系统自动化》. 2011, 第35卷(第16期), 全文.

审查员 李丹

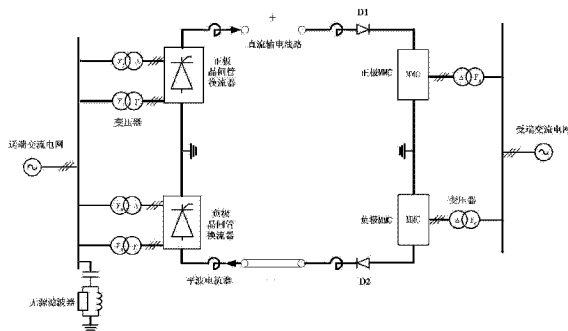
权利要求书1页 说明书7页 附图7页

(54) 发明名称

一种混合双极直流输电系统

(57) 摘要

本发明公开了一种混合双极直流输电系统,包括:整流换流站和逆变换流站,两者通过直流输电线路相连;整流换流站由两台晶闸管换流器串联组成,其串节点接地;逆变换流站由两台MMC串联组成,其串节点接地,串联后的正负两端均连接有单向导通功率器件。本发明系统兼具传统晶闸管换流器造价低、损耗低、可靠性强等优点,以及MMC控制灵活、低谐波、有功无功功率解耦控制、对交流系统依赖性低等优点;系统分为正负两极加强了运行的可靠性,并且在逆变器出口处加装的具有单向导通能力的功率器件能够有效地处理直流故障。因此,本发明适用于大功率、长距离高压直流输电、孤岛送电等场合,具有广阔的发展空间,值得大力推广。



1. 一种混合双极直流输电系统,包括:整流换流站和逆变换流站,两者通过直流输电线路相连;其特征在于:

所述的整流换流站用于将送端交流电网的三相交流电转换为直流电后通过直流输电线路传送给逆变换流站;整流换流站由两台晶闸管换流器串联组成,其串节点接地;

所述的逆变换流站用于将所述的直流电转换为三相交流电后输送给受端交流电网;逆变换流站由两台 MMC 串联组成,其串节点接地,串联后的正负两端均连接有单向导通功率器件;

所述的晶闸管换流器采用十二脉动桥式结构,每个桥臂均由若干个晶闸管串联组成;

所述的送端交流电网进站的三相母线上连接有无源滤波器;

所述的整流换流站正负两端均通过平波电抗器与直流输电线路相连接;所述的逆变换流站正负两端连接的两个单向导通功率器件均通过平波电抗器与直流输电线路相连接;

所述的晶闸管换流器通过一台接线方式为 $Y_0/Y/\Delta$ 的三绕组变压器或两台接线方式分别为 Y_0/Δ 和 Y_0/Y 的双绕组变压器与送端交流电网连接;

所述的单向导通功率器件由若干个二极管或晶闸管串联构成;

所述的 MMC 通过接线方式为 Δ/Y_0 或 Y/Y_0 的双绕组变压器与受端交流电网连接,其采用三相六桥臂结构,每个桥臂均由若干个换流模块串联组成;

所述的换流模块采用 HBSM, HBSM 由两个开关管 T1 ~ T2 和一个电容 C 构成;其中,开关管 T1 的输出端与开关管 T2 的输入端相连并构成 HBSM 的一端,开关管 T1 的输入端和电容 C 的一端相连,开关管 T2 的输出端与电容 C 的另一端相连并构成 HBSM 的另一端;所述的两个开关管 T1 ~ T2 的控制端均接收外部设备提供的开关信号。

一种混合双极直流输电系统

技术领域

[0001] 本发明属于电力系统输电技术领域,具体涉及一种混合双极直流输电系统。

背景技术

[0002] 随着电力科学技术的发展,基于晶闸管换流器的传统高压直流输电系统的造价逐年降低,电力输送的可靠性不断提高,站内损耗渐渐减小。目前,基于晶闸管换流器的传统高压直流输电系统已经被广泛应用于大容量远距离输电、海岛输电以及异步电网背靠背互联等场合。但是,基于晶闸管换流器的传统高压直流输电系统有以下三个主要的缺陷:(1) 逆变侧易换相失败;由于晶闸管换流器的主要器件晶闸管属于半控型器件,其换相方式采用电网换相,因此交流电网的波动或者故障有可能导致逆变侧的晶闸管换流器出现换相失败,这将造成交流系统的巨大冲击,严重地影响系统稳定安全运行。(2) 对交流系统的依赖性强;基于晶闸管换流器的传统高压直流输电系统无法对弱交流系统以及无源网络进行输电;(3) 换流站占地面积大;因此直流落点的选址上存在着较大的问题,对于发达的东南沿海地区,修建一座基于晶闸管的传统高压直流换流站会造成较大的土地资源浪费。综上所述,基于晶闸管换流器的传统高压直流输电系统存在着的较大的缺陷,一定程度上制约了它的发展。

[0003] 基于模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 的直流输电系统是一种较为新颖的柔性直流输电系统,其拓扑结构的基本单元是半桥子模块。相较于基于晶闸管换流器的传统高压直流输电系统,模块化多电平换流器直流输电系统有着诸多优点,例如能够实现有功功率及无功功率解耦控制、开关频率低、运行损耗低、输出电压波形谐波系数低、滤波系统成本低廉、拓展性强、结构紧凑占地面积小、不存在换相失败故障等等。在光伏、风电和潮汐等新能源并网,超大规模城市输配电,偏远海岛、孤立负荷以及无源网络供电等应用场合,模块化多电平换流器直流输电系统有着很强的竞争力。然而,模块化多电平换流器直流输电系统同样也存在两个较大的缺陷:(1) 无法有效的处理直流侧的故障,系统可靠性低。当直流侧发生故障时,全控型开关器所反向并联的蓄流二极管会造成能量馈送点与故障点之间的能量回馈回路,这会造成瞬时的过电流,因此必须跳开交流断路器将其切断,但交流断路器的机械响应时间最快也需要 2~3 个周波,而短路过电流在这 2~3 个周波的时间内已经增大到较大的数值;因此在选择设备时不得不增大设备的额定参数,并且配置高速的旁路开关等辅助性措施;这大大地增加了换流站的建造成本;而且,模块化多电平换流器直流输电系统常常需要使用故障率低、造价高的电缆线路作为其直流输电线路,而无法使用闪络等暂时性故障率高、造价低的架空线路输电,这导致了其无法应用于长距离直流输电场合。(2) 接地支路设计、安装困难。目前采用的接地方式主要有两种:一是在模块多电平换流器的交流侧安装三相星形连接的电抗支路为换流站提供参考电位,但是电抗参数选择较为困难,并且会对换流器本身的无功功率的运行范围造成影响;二是采用直流侧大电阻嵌位接地方式,但是大电阻参数的选取较为困难,当电阻取得过小则稳态运行时的损耗会增大,当电阻取得过大则失去了接地的意义。综上所述,基于模块化多

电平换流器直流输电系统存在着的较大的缺陷,一定程度上制约了它的发展。

发明内容

[0004] 针对现有技术所存在的上述技术缺陷,本发明提供了一种混合双极直流输电系统,结合了基于晶闸管换流器以及基于 MMC 的直流输电拓扑的优点;解决了逆变侧换相失败及直流侧无法自清理故障等技术问题,占地面积小,接地方式设计简易。

[0005] 一种混合双极直流输电系统,包括:整流换流站和逆变换流站,两者通过直流输电线路相连;其中:

[0006] 所述的整流换流站用于将送端交流电网的三相交流电转换为直流电后通过直流输电线路传送给逆变换流站;整流换流站由两台晶闸管换流器串联组成,其串关节点接地;

[0007] 所述的逆变换流站用于将所述的直流电转换为三相交流电后输送给受端交流电网;逆变换流站由两台 MMC 串联组成,其串关节点接地,串联后的正负两端均连接有单向导通功率器件。

[0008] 所述的单向导通功率器件由若干个二极管或晶闸管串联构成。

[0009] 优选地,所述的送端交流电网进站(整流换流站)的三相母线上连接有无源滤波器;其用于滤除交流侧的电压谐波,提供一定的无功补偿。

[0010] 优选地,所述的整流换流站正负两端均通过平波电抗器与直流输电线路相连接;所述的逆变换流站正负两端连接的两个单向导通功率器件均通过平波电抗器与直流输电线路相连接;能够对直流电流中的纹波进行平抑,防止直流输电线路产生的陡波前冲击波进入换流站导致器件遭受过电压而损坏,同时避免电流断续。

[0011] 优选地,所述的晶闸管换流器采用十二脉动桥式结构,每个桥臂均由若干个晶闸管串联组成;十二脉动桥式晶闸管换流器可减少自身所产生的谐波电流。

[0012] 优选地,所述的晶闸管换流器通过一台接线方式为 $Y_0/Y/\Delta$ 的三绕组变压器或两台接线方式分别为 Y_0/Δ 和 Y_0/Y 的双绕组变压器与送端交流电网连接;能够起到电压等级变换和隔离零序分量在换流器与交流系统之间传递的作用,且这样的变压器能为晶闸管换流器的上下两个六脉动换流桥提供相角差为 30° 的三相交流电。

[0013] 优选地,所述的 MMC 通过接线方式为 Δ/Y_0 或 Y/Y_0 的双绕组变压器与受端交流电网连接,其采用三相六桥臂结构,每个桥臂均由若干个换流模块串联组成;其输出的三相交流电具有很小的谐波含量,几乎不需任何滤波器,同时其结构特性大大降低了器件的开关频率,进而减少损耗,控制灵活。

[0014] 进一步优选地,所述的换流模块采用 HBSM(半桥子模块);所需半导体器件数量最少,稳态运行损耗小。

[0015] 所述的 HBSM 由两个开关管 $T1 \sim T2$ 和一个电容 C 构成;其中,开关管 $T1$ 的输出端与开关管 $T2$ 的输入端相连并构成 HBSM 的一端,开关管 $T1$ 的输入端和电容 C 的一端相连,开关管 $T2$ 的输出端与电容 C 的另一端相连并构成 HBSM 的另一端;所述的开关管的控制端接收外部设备提供的开关信号。

[0016] 所述的开关管采用 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)。

[0017] 本发明在正常工作时,两台正负极晶闸管换流器通过控制晶闸管触发角的大小来

调整直流侧电压的大小,通过整流换流站将三相交流电转变为直流电;两台正负极 MMC 实现有功无功解耦控制,能够灵活控制有功功率与无功功率;直流电流从整流换流站的正端流出,经过平波电抗器的平抑作用使得直流电流变得平滑,通过正极直流输电线路的输送,直流电流经正极单向导通功率器件后注入正极 MMC 的正端,并从其负端流出;从正极 MMC 流出的电流流入负极 MMC 的正端,再从其负端流出;电流经过负极单向导通功率器件和平波电抗器,通过负极直流输电线路流入整流换流站的负端。

[0018] 在直流线路发生单极直流故障时,故障极整流侧晶闸管换流器闭锁,则故障极整流侧输出的直流电流降为零,即不会产生直流故障的过电流。故障极逆变侧由于具有单向导通能力的大功率器件反向截止的作用,截断了逆变侧交流系统与故障点之间的能量回路,亦不会产生直流故障的过电流。此时系统由正常运行模式切换到单极运行模式。

[0019] 在直流线路发生双极直流故障时,整流侧晶闸管换流器全部闭锁,则整流侧输出的直流电流下降为零,即不会产生直流故障的过电流。逆变侧由于具有单向导通能力的大功率器件反向截止的作用,截断了逆变侧交流系统与故障点之间的能量回路,亦不会产生直流故障的过电流。此时直流输电系统所连接的两端交流系统不再有能量交换,直流系统进入运行重启的等待模式。

[0020] 本发明相对于传统基于晶闸管换流器的直流输电系统,由于受端逆变侧采用模块化多电平换流器,从根本上解决了传统直流输电系统逆变侧换相失败、对交流系统依赖性强以及逆变站占地空间大、滤波器设计等问题,且适用于向多直流落点区域、无源网络或弱交流系统供电等场合。相对于传统基于模块化多电平柔性高压直流输电系统,由于送端整流侧使用晶闸管的十二脉动桥式换流器,控制方便,可以大大减少造价不菲的全控器件数量,节约了成本,降低了损耗,可靠性高,控制灵活。

[0021] 本发明系统分为正负两极系统,双极运行大大提升了直流输电系统的稳定运行能力,接地方式设计简易;且创新性地 在逆变侧换流站的正负极直流端口处加设有单向导通能力的功率器件,能够起到直流线路故障自清理的作用,使得系统能够应用于远距离、大功率的直流输电领域,具有广阔的应用前景,值得大力推广。

附图说明

[0022] 图 1 为本发明直流输电系统的结构示意图。

[0023] 图 2 为晶闸管换流器的结构示意图。

[0024] 图 3 为 MMC 的结构示意图。

[0025] 图 4 为 HBSM 的结构示意图。

[0026] 图 5(a) 为正极功率与负极功率相同时本发明系统运行示意图。

[0027] 图 5(b) 为正极功率大于负极功率时本发明系统运行示意图。

[0028] 图 5(c) 为正极功率小于负极功率时本发明系统运行示意图。

[0029] 图 6(a) 为正极输电线路发生直流故障时本发明系统运行示意图。

[0030] 图 6(b) 为负极输电线路发生直流故障时本发明系统运行示意图。

[0031] 图 6(c) 为双极输电线路发生直流故障时本发明系统运行示意图。

[0032] 图 7(a) 为发生直流故障时本发明系统整流侧直流电压波形示意图。

[0033] 图 7(b) 为发生直流故障时本发明系统整流侧直流电流波形示意图。

[0034] 图 7(c) 为发生直流故障时本发明系统逆变侧直流电压波形示意图。

[0035] 图 7(d) 为发生直流故障时本发明系统逆变侧直流电流波形示意图。

具体实施方式

[0036] 为了更为具体地描述本发明,下面结合附图及具体实施方式对本发明的技术方案及其相关原理进行详细说明。

[0037] 如图 1 所示,一种混合双极直流输电系统,包括:整流换流站和逆变换流站,两者通过直流输电线路相连;其中:

[0038] 整流换流站用于将送端交流电网的三相交流电转换为直流电后通过直流输电线路传送给逆变换流站;

[0039] 送端交流电网进站的三相母线上连接有无源滤波器,其具体类型、容量、组数和调谐点等根据系统工程条件来确定,一般可采用双调谐滤波器和并联电容器相配合,以滤除整流换流站所产生的特征次谐波电流,必要时可配置 C 型滤波器以滤除低次谐波。

[0040] 整流换流站由两台晶闸管换流器串联组成,其串关节点接地,串联后的正负两端均通过平波电抗器与直流输电线路相连接;

[0041] 如图 2 所示,晶闸管换流器采用十二脉动桥式结构;其中,每个桥臂均由若干个晶闸管串联构成;晶闸管换流器采用定直流电压控制策略控制。

[0042] 晶闸管换流器通过两台接线方式分别为 Y_0/Δ 和 Y_0/Y 的双绕组变压器与送端交流电网连接。变压器能够对送端交流系统的三相交流电进行电压等级交换,以适应所需的直流电压等级,两变压器接线方式的不同为十二脉动桥式晶闸管换流器的上下两个六脉动换流桥提供相角差为 30° 的三相交流电。

[0043] 逆变换流站用于将直流电转换为三相交流电后输送给受端交流电网;逆变换流站由两台 MMC 串联组成,其串关节点接地,串联后的两端口均连接有单向导通功率器件;单向导通功率器件 D1 的阴极与逆变换流站的正端相连,阳极通过平波电抗器与正极直流输电线路相连接;单向导通功率器件 D2 的阳极与逆变换流站的正端相连,阴极通过平波电抗器与负极直流输电线路相连接;本实施方式中,单向导通功率器件由多个二极管串联构成。

[0044] 如图 3 所示,MMC 采用三相六桥臂结构;其中,每个桥臂均由若干个换流模块串联组成;MMC 采用定有功功率和定无功功率控制策略控制,MMC 通过一台接线方式为 Δ/Y_0 的双绕组变压器与受端交流电网连接。

[0045] 换流模块采用 HBSM,如图 4 所示,其由两个 IGBT 管 T1 ~ T2 和一个电容 C 构成;其中,IGBT 管 T1 的发射极与 IGBT 管 T2 的集电极相连并构成 HBSM 的一端,IGBT 管 T1 的集电极和电容 C 的一端相连,IGBT 管 T2 的发射极与电容 C 的另一端相连并构成 HBSM 的另一端;IGBT 管 T1 ~ T2 的门极均接收外部设备提供的开关信号。

[0046] HBSM 的投切策略采用最近电平调制法和子模块电容电压均衡策略。

[0047] 本实施方式在稳态情况下的基本工作原理如图 5 所示,正常工作时正极系统与负极系统的整流侧晶闸管换流器通过控制晶闸管触发角的大小来调整直流侧电压的大小,通过整流换流站将三相交流电转变为直流电;正极系统与负极系统的逆变侧 MMC 负责将直流电能转化为三相交流电能并注入受端交流系统,其能够实现有功无功解耦控制,灵活控制输入到交流电网的有功功率以及无功功率;在直流输电系统中,直流电流从正极系统晶闸

管换流器的正端子①流出,经过正极系统平波电抗器的平抑作用,输出的直流电流变得平滑,通过正极系统直流输电线路的输送,直流电能流经正极系统的具有单向导通能力的功率器件,注入正极系统 MMC 的正端子②,并从其负端子③流出。从③中流出电流的一部分 IG2 流入逆变侧的接地极,另一部分流入负极系统 MMC 的正端子④,再从其负端子⑤流出。此部分电流经过负极系统的具有单向导通能力的功率器件、负极直流输电线路和负极系统的平波电抗器后,流入负极系统的晶闸管换流器的负端子⑥,然后再从负极系统的晶闸管换流器的正端子⑦流出。从⑦中流出电流的一部分 IG1 流入整流侧接地极,另一部分则流入正极系统的晶闸管换流器负端子⑧。

[0048] 当正极系统传输的功率与负极系统传输的功率相同的时候,如图 5(a) 所示,两端直流系统流入接地极的电流 IG1 以及 IG2 都为零;当正极系统传输的功率大于负极系统传输的功率的时候,如图 5(b) 所示,整流侧流入接地极的电流 $IG1 < 0$ 逆变侧流入接地极的电流 $IG2 > 0$;当正极系统传输的功率小于负极系统传输的功率的时候,如图 5(c) 所示,整流侧流入接地极的电流 $IG1 > 0$,逆变侧流入接地极的电流 $IG2 < 0$ 。

[0049] 本实施方式在直流故障时的自清理故障的原理如下:在直流线路发生正极(或负极)直流接地短路故障时,如图 6(a) 与 6(b) 所示,正极(或负极)整流侧晶闸管换流器闭锁,则正极(或负极)整流侧输出的直流电流降为零,即不会产生直流故障的过电流。正极(或负极)逆变侧由于具有单向导通能力的大功率器件反向截止的作用,截断了逆变侧交流系统与故障点之间的能量馈路,亦不会产生直流故障的过电流。此时系统由正常运行模式切换到单极运行模式;在直流线路发生双极直流故障时,如图 6(c) 所示,整流侧晶闸管换流器全部闭锁,则整流侧输出的直流电流下降为零,即不会产生直流故障的过电流。逆变侧由于具有单向导通能力的功率器件反向截止的作用,截断了逆变侧交流系统与故障点之间的能量馈路,亦不会产生直流故障的过电流。此时直流输电系统所连接的两端交流系统不再有能量交换,直流系统进入运行重启的等待模式。

[0050] 为了进一步验证本实施方式的有效性和可行性,通过在电力系统暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建相应模型,具体仿真参数如表 1 所示。

[0051] 表 1

	额定直流电压	±500KV	
	额定直流电流	2KA	
	额定传输功率	2000MVA	
	整流交流系统电压等级	345KV	
	逆变交流系统电压等级	220KV	
[0052]	整流侧换流变压器	组号	1 号 2 号
		接线方式	Y_0/Δ Y_0/Y
		变比	345kV:213 kV 345kV:213kV
		容量	600MVA 600MVA
逆变侧换流变压器	接线方式	Δ/ Y_0	
	变比	250kV: 220kV	
	容量	1000MVA	
	平波电抗器	0.15H	
	直流输电线路	1000km	
	MMC 桥臂子模块数	100 个 (6 个桥臂总共 600 个)	
	MMC 子模块电容	31200uF	
	MMC 桥臂电感	0.012H	

[0053] 单极接地故障是输电线路最容易发生的故障类型,传统直流输电系统能够通过强迫移相使整流器进入逆变方式,令弧道电流和弧道电压迅速降低到零以实现故障快速消除。鉴于直流断路器研制困难和自身拓扑特点等原因,发生直流故障后直接跳开交流侧的断路器是基于 MMC 输电系统常用的手段。而本实施方式在逆变侧换流器直流出口处加装了具有单向导通能力的功率器件,阻断了逆变侧交流系统与直流故障点之间的能量回馈,快速地实现了直流故障的清理。假设故障发生在正极直流输电线路中间距离逆变侧 500km 处,故障于 6s 引入。整流侧换流站在故障发生后 5ms 即发出闭锁信号,短路故障消失后,故障的输电线路去能,再经过一段无电压时间(大约为 0.2 ~ 0.5s),本例选取 0.4s,让闪络故障经过充分去游离,输电线路的绝缘性能恢复到能够承受正常电压。2s 时系统重启动,整流器解锁,其直流电压指令值 u_{d1ord} 以 10.5pu/s 的速率增长至 1.05pu;同时解锁逆变侧 MMC,逆变侧交流系统吸收的有功功率及无功功率指令值 P_{ord} 、 Q_{ord} 以 1pu/s 的速率分别由 0 增长至 1pu 和 0.3pu;在故障重启动后系统恢复稳态运行;故障响应特性如图 7 所示。其中图 7(a) 为发生直流故障时整流侧直流电压随时间变化的波形;图 7(b) 为发生直流故障时整流侧直流电流随时间变化的波形;由图可见,在发生正极直流故障后,整流侧正极传统直流输电换流站通过强迫换向使之闭锁,而整流侧负极传统直流输电换流站直流电压电流在小幅波动后运行状态正常。图 7(c) 为发生直流故障时逆变侧直流电压随时间变化的波形;图 7(d) 为发生直流故障时逆变侧直流电流随时间变化的波形;由图可见,在发生正极直流故障后,逆变侧正极换流站由于直流出口处单向导通能力的大功率器件的反向截止作用,直流电流降为 0,而逆变侧负极换流站直流电压电流在小幅波动后运行状态正常。在故障清除之后,系统能够平滑地恢复至稳定运行值。从上述仿真结果可得,在逆变站直流出口加装具有单向导通能力的功率器件能够有效地清理直流故障,解决了模块化多电平换流器无法

处理直流故障的问题。

[0054] 因此,本实施方式的混合型直流输电系统,兼具传统晶闸管换流器造价低、损耗低、可靠性强等优点,以及 MMC 控制灵活、低谐波、有功无功功率解耦控制、对交流系统依赖性低等优点。系统分为正负两极加强了系统运行的可靠性,并且在逆变器出口处加装的具有单向导通能力的功率器件能够有效地处理直流故障。因此,本发明适用于大功率、长距离高压直流输电、孤岛送电等场合,具有广阔的发展空间,值得大力推广。

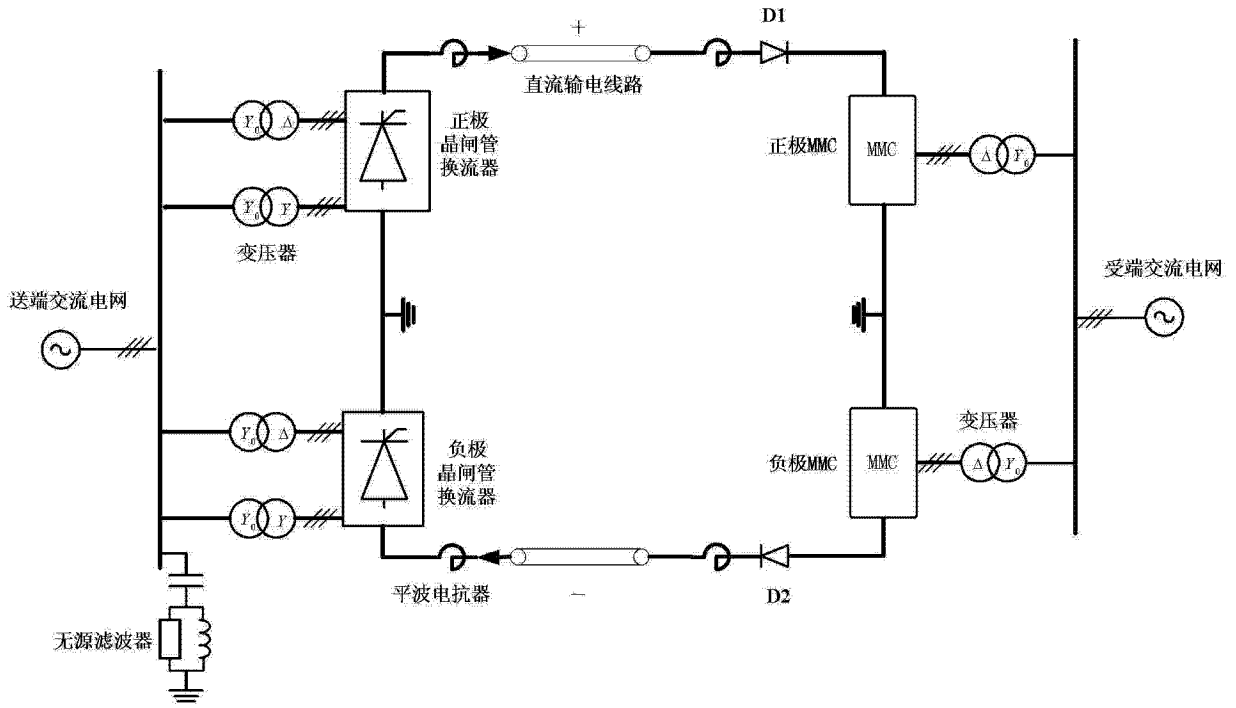


图 1

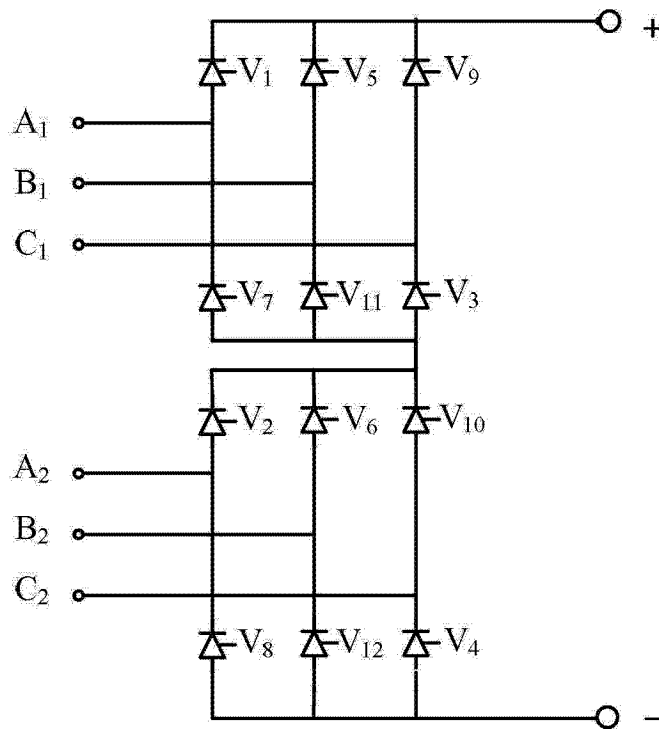


图 2

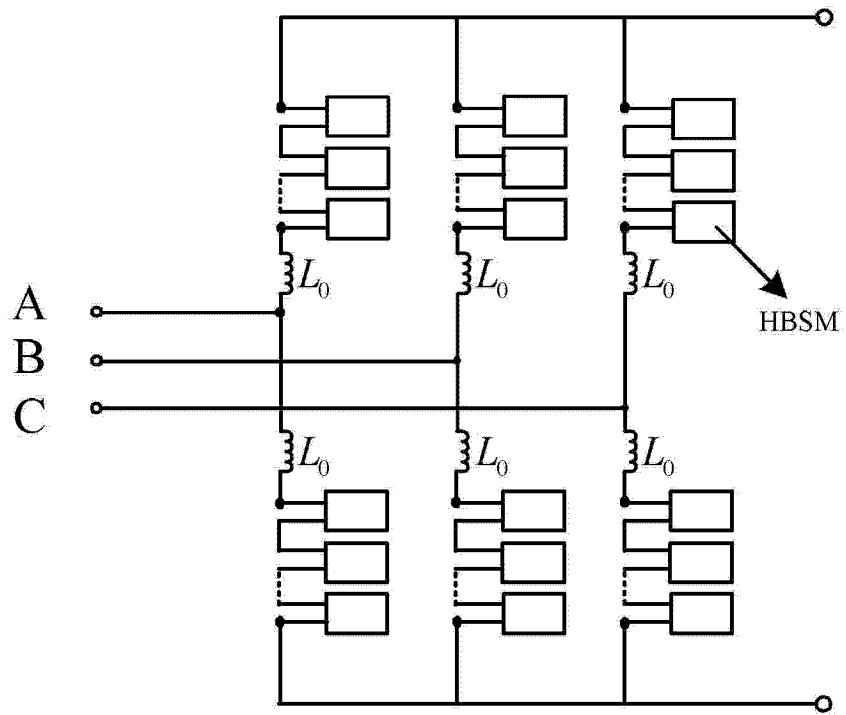


图 3

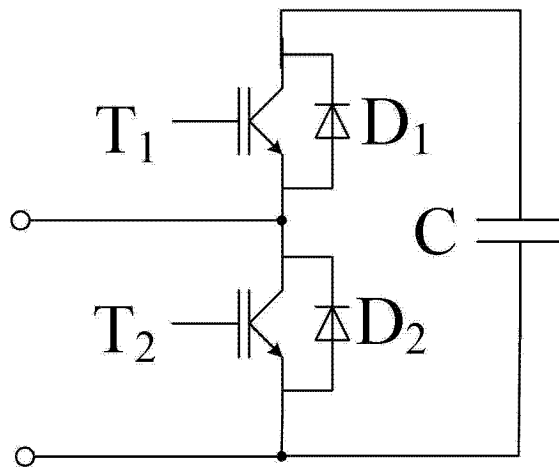
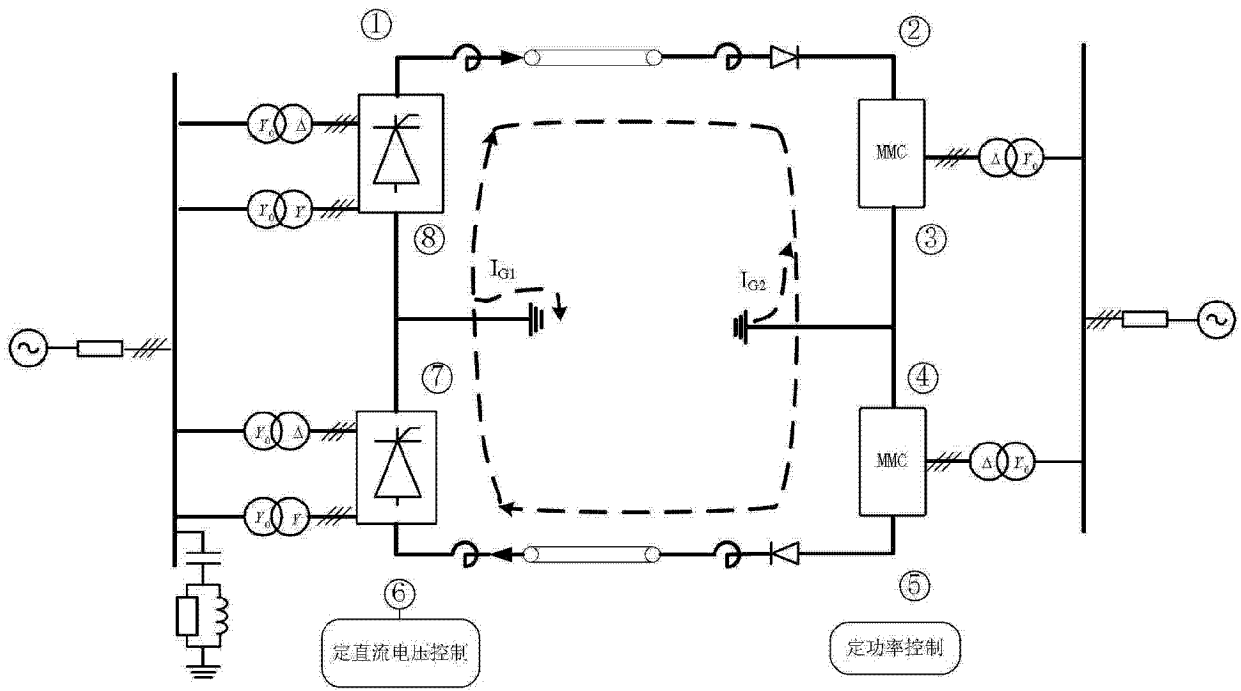
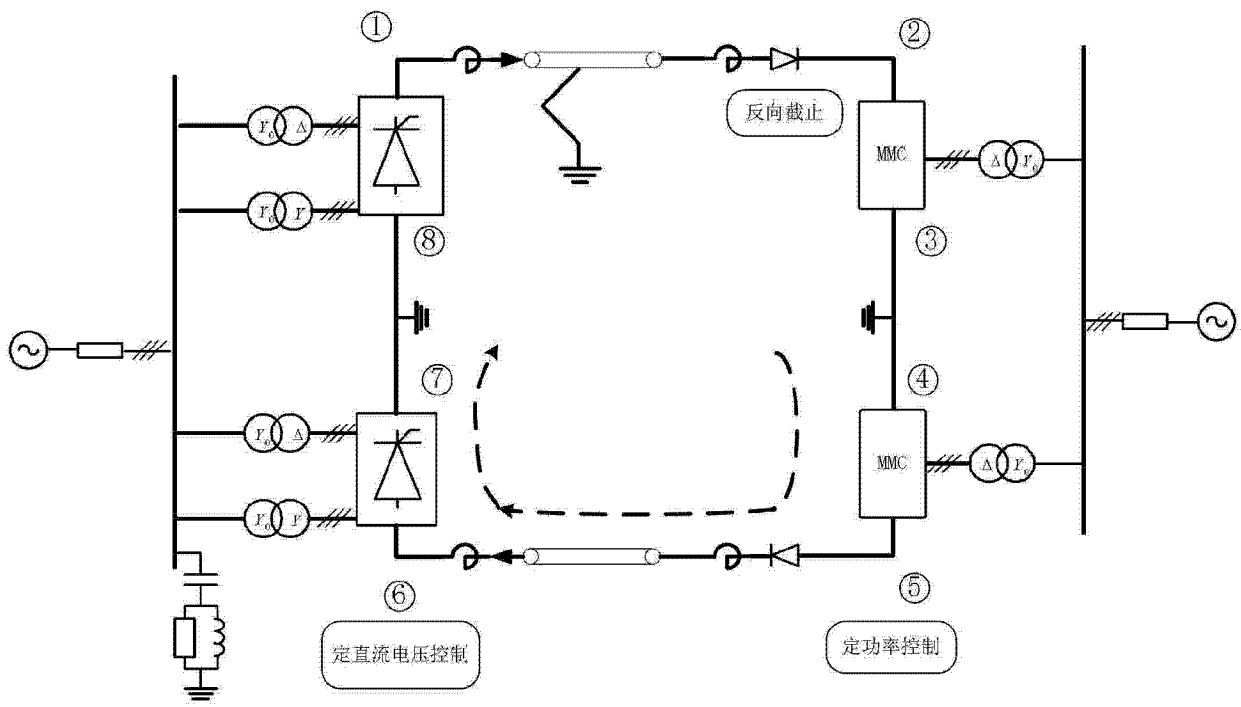


图 4

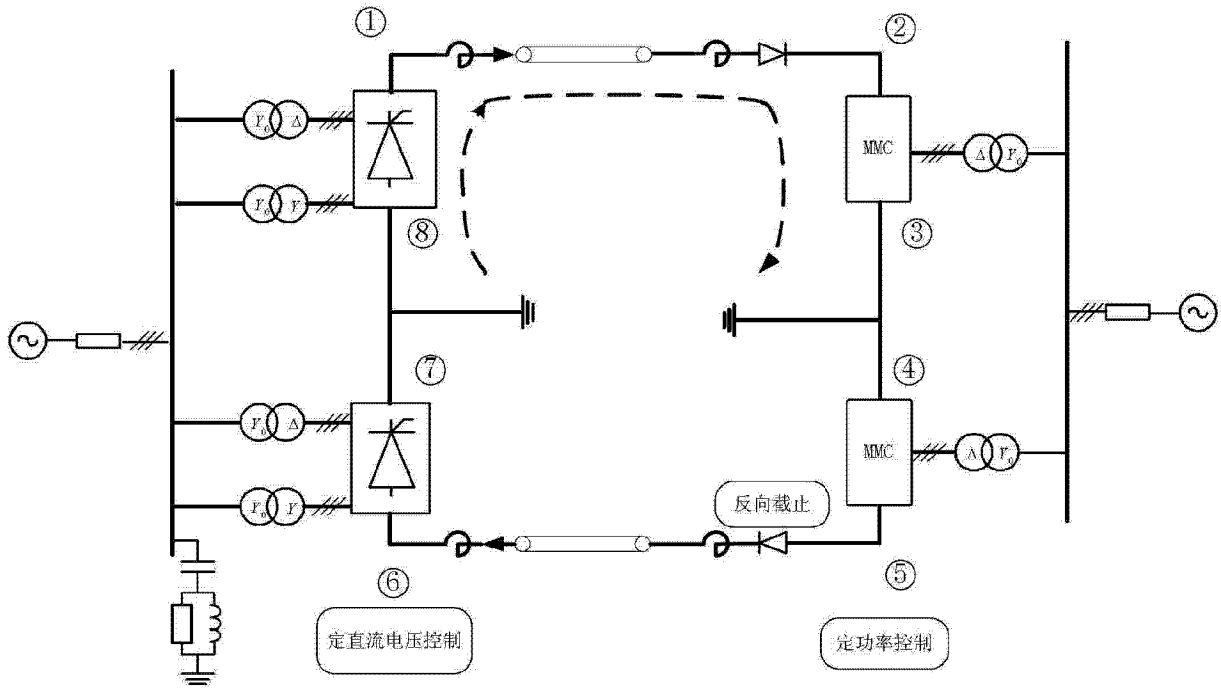


(c)

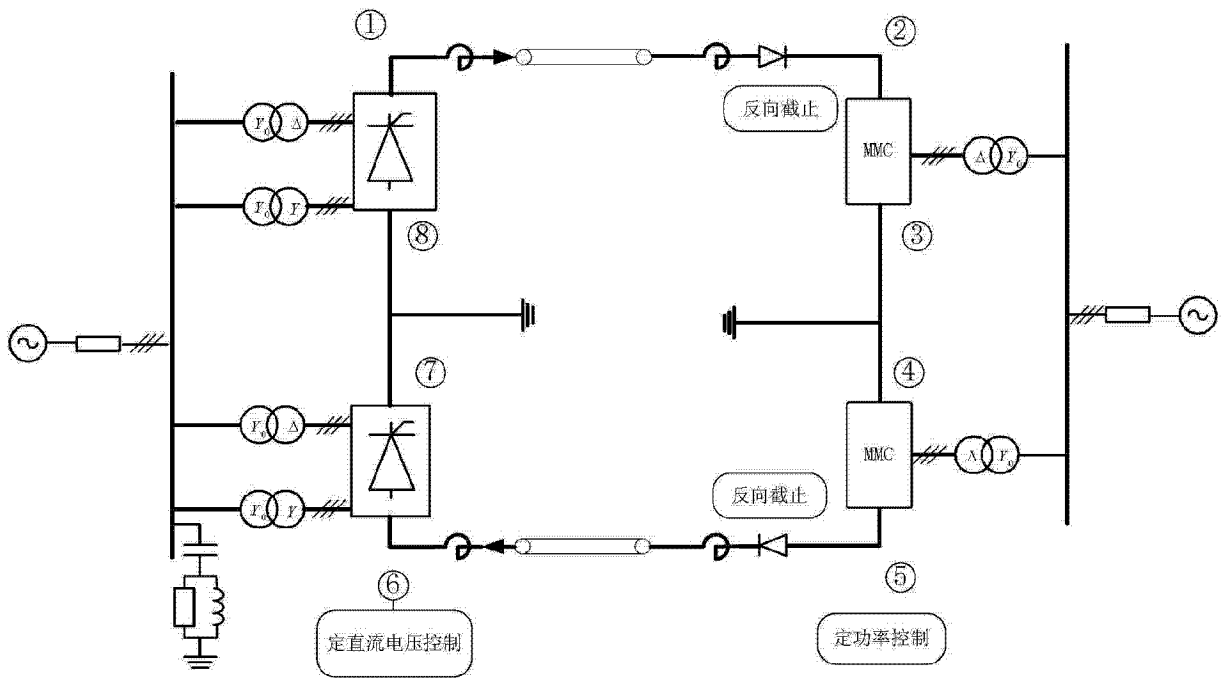
图 5



(a)

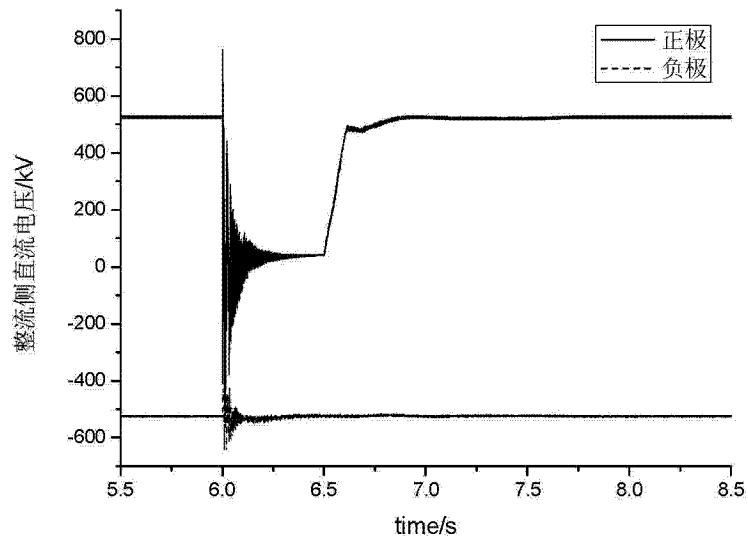


(b)

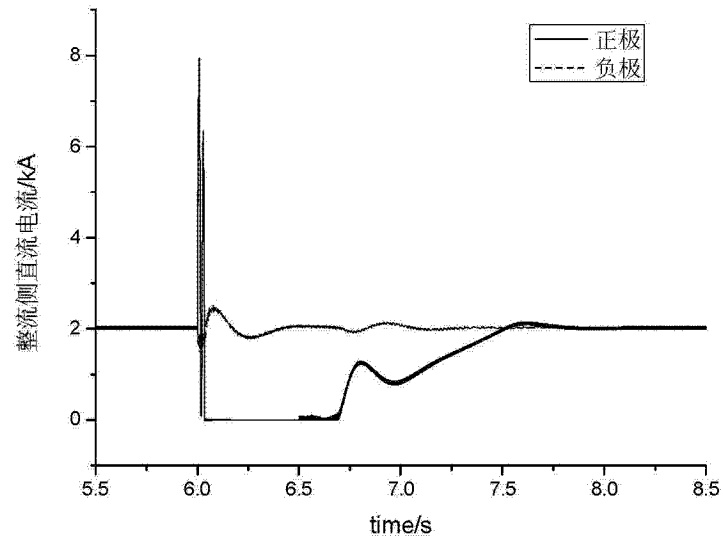


(c)

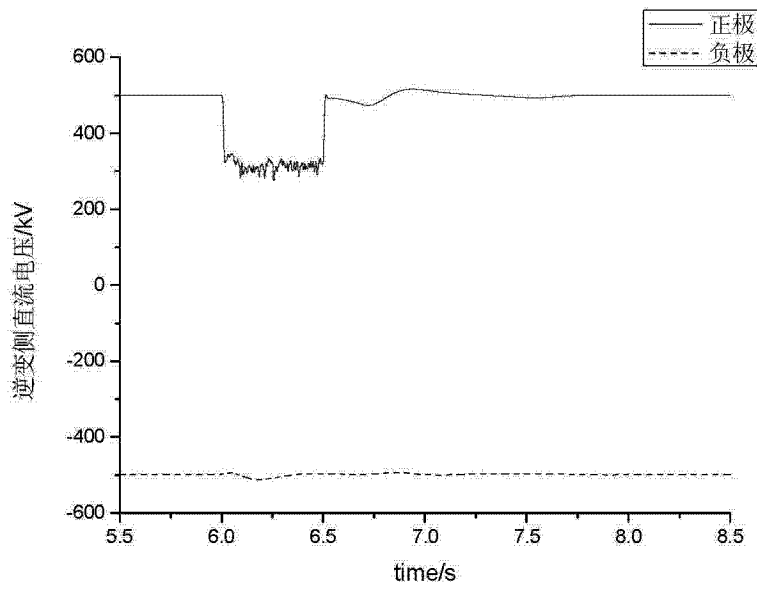
图 6



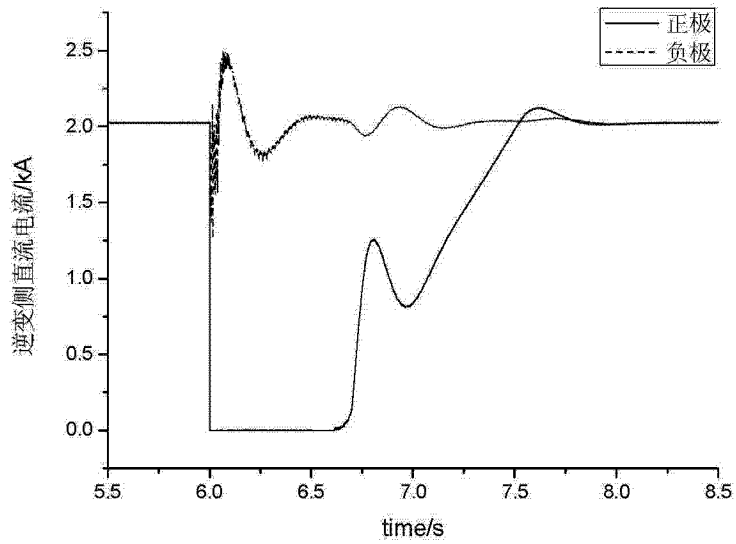
(a)



(b)



(c)



(d)

图 7