(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105406500 B
(45)授权公告日 2017.10.31

(21)申请号 201510961601.3
(22)申请日 2015.12.18
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105406500 A
(43)申请公布日 2016.03.16
(73)专利权人 华中科技大学
地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路1037号
(72)发明人 胡家兵 徐克成 万敏
(74)专利代理机构 华中科技大学专利中心 42201
代理人 廖盈春
(51)Int.Cl.
H02J 3/36(2006.01)

审查员 王笑寒

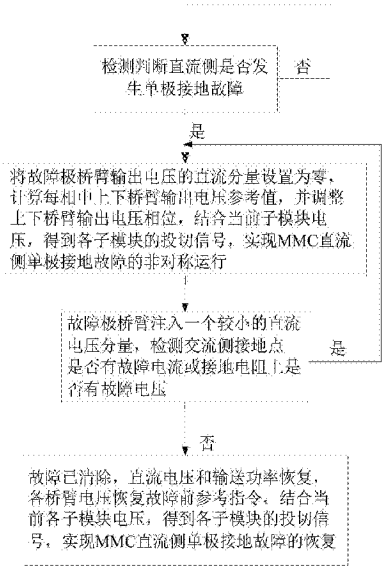
权利要求书1页 说明书9页 附图9页

(54)发明名称

MMC-HVDC系统直流侧单极接地故障的非对称运行控制方法

(57)摘要

本发明公开了一种MMC-HVDC系统直流侧单极接地故障的非对称运行控制方法。对于基于单极对称接线的MMC-HVDC系统，发生直流侧单极接地故障之后，不需要闭锁换流器，通过将故障极桥臂输出电压直流分量设置为零即可快速消除交、直流侧过电压和故障电流，从而消除对交、直流系统的绝缘威胁；通过调整不同桥臂电压交流分量的相角，使系统在隔离直流侧单极接地故障的同时还能继续传输一半的额定有功功率并且为交流系统提供无功支撑，对连接的交、直流系统稳定性有积极意义；故障期间换流器不需要退出运行，系统恢复速度快，整个过程换流器处于受控状态，提高了单极对称接线配置下MMC-HVDC系统对直流侧单极接地故障的主动防御能力。



CN 105406500 B

1.一种MMC-HVDC系统的直流侧单极接地故障的非对称运行控制方法，所述MMC-HVDC系统中MMC换流器各桥臂具备负电平输出能力，且桥臂的最小负电平输出能力能达到额定直流电压的一半，其特征在于，所述方法包括如下步骤：

(1)检测判断直流侧是否发生单极接地故障，是则顺序执行步骤(2)，否则继续检测；

(2)控制直流侧电压U_{dc}至额定值U_{dc0}的一半，调整故障极桥臂输出电压中的直流分量为0，调整非故障极桥臂输出电压中的直流分量为额定直流电压的一半，以消除过电压与故障电流；

(3)根据系统要求传输的有功功率和无功功率指令，确定换流器输出三相内电势的参考值e_j，同时根据换流器三相上桥臂总能量ΣW_{pj}和三相下桥臂总能量ΣW_{nj}之差，调整三相上、下桥臂输出电压的相角，进而调整三相上、下桥臂输出电压参考值，使非故障极桥臂和故障极桥臂在传输不同功率的同时维持桥臂子模块电容电压的相对平衡，其中，下标j＝a，b，c，分别表示a、b、c三相；

(4)在故障极桥臂中注入较小的直流电压分量，判断交流系统接地点是否有故障电流或者接地电阻是否产生压降，是则返回步骤(2)，否则说明单极接地故障已消除，系统恢复正常运行。

2.如权利要求1所述的MMC-HVDC系统的直流侧单极接地故障的非对称运行控制方法，其特征在于，所述步骤(3)中，换流器三相上桥臂总能量$\sum W_{pj}=\frac{C_0}{2}\sum_{i=1}^{3N}\left(u_{cp_i}\right)^2$，换流器三相下桥臂总能量$\sum W_{nj}=\frac{C_0}{2}\sum_{i=1}^{3N}\left(u_{cn_i}\right)^2$，其中，$C_0$为桥臂子模块电容值，N为每相桥臂的子模块个数，$u_{cp_i}$为上桥臂第i个子模块电容电压，$u_{cn_i}$为下桥臂第i个子模块电容电压。

3.如权利要求1或2所述的MMC-HVDC系统的直流侧单极接地故障的非对称运行控制方法，其特征在于，在负极线路发生单极接地故障时，下桥臂为故障极桥臂，上桥臂为非故障极桥臂，将三相上桥臂输出电压参考值调整至$u_{pj_ref}=\frac{U_{dc0}}{2}-e_j\sin(\omega t+\varphi+\Delta\delta)$，将三相下桥臂输出电压参考值调整至$u_{nj_ref}=e_j\sin(\omega t+\varphi-\Delta\delta)$；在正极线路发生单极接地故障时，上桥臂为故障极桥臂，下桥臂为非故障极桥臂，将三相上桥臂输出电压参考值调整至$u_{pj_ref}=-e_j\sin(\omega t+\varphi+\Delta\delta)$，将三相下桥臂输出电压参考值调整至$u_{nj_ref}=\frac{U_{dc0}}{2}+e_j\sin(\omega t+\varphi-\Delta\delta)$；其中，ω是交流系统的额定频率，t为时间，$\varphi$为换流器输出内电势的初始相位，Δδ为上、下桥臂输出电压的相角调整量，e_j表示换流器输出三相内电势的参考值。

MMC-HVDC系统直流侧单极接地故障的非对称运行控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于多电平电力电子变换器技术领域，更具体地，涉及一种MMC-HVDC系统直流侧单极接地故障的非对称运行控制方法。

背景技术

[0002] 基于柔性直流输电的直流电网技术，在大规模分布式可再生能源接入、海洋群岛供电、海上风电场群集中送出、新型城市电网构建等方面，被认为是最有效的技术方案，已成为目前国际电力领域研究的热点。直流输电网络的技术及构建，已经成为未来电网的重要发展方向和组成部分。基于模块化多电平换流器的高压直流输电(Modular Multilevel Converter Based High Voltage Direct Current,MMC-HVDC)系统因其在系统损耗、容量提升、电磁兼容、故障管理等方面的优势，已经在柔性直流输电技术中取得了重要地位。

[0003] 在MMC-HVDC直流输电系统中，直流线路单极接地故障虽然没有极间故障后果严重，但是其发生的可能性较大，而且单极接地故障发生后，会引起直流正、负母线电压不平衡，进而影响整个系统的正常运行，所以需要对其故障处理方式进行专门的研究。目前针对不同接线方式下的MMC-HVDC系统直流侧单极接地故障处理方式如下：

[0004] 1)基于单极对称接线的MMC-HVDC系统，其单极接地故障特征与系统接地方式密切相关，目前主要的三种系统接地方式分别为：交流侧并联星形电抗经电阻接地，交流侧联结变压器Y绕组经接地电阻接地和直流侧并联钳位电阻接地，分别如图1、图2和图3所示。以上三种接地方式的系统在发生直流侧单极接地故障后都会在交流侧产生接近一半额定直流电压大小的直流偏置，同时直流侧非故障极的母线电压增大到正常运行时的两倍，故障产生的过电压威胁交直流系统的绝缘安全。不仅如此，采用交流侧接地的MMC-HVDC系统还会在接地点产生较大的故障电流，加快系统节点的腐蚀。单极对称接线的MMC-HVDC系统目前处理直流侧单极接地故障的方法是通过在故障后闭锁换流器，然后断开交流侧断路器，消除交、直流系统过电压和故障电流，这意味着故障后系统将暂时退出运行，需等待故障消除后才能恢复。虽然单极对称接线配置下MMC-HVDC在应对直流侧单极接地故障方面非常被动，但是因其具有较低的建设成本和对配套设备较低的技术要求，还是被广泛运用在目前实际运行的工程中。

[0005] 2)基于双极对称接线的MMC-HVDC系统，如图4所示，在发生直流侧单极接地故障之后，目前采取的方法是让故障极换流器退出运行，非故障极换流器继续运行。但是此种接线方式相比于单极对称接线的MMC-HVDC系统而言，每一极的交流侧在正常运行时都要承受一半额定直流电压的直流偏置，因而提高了变压器及联结区相关设备的制造难度，建设成本高，目前世界上唯一采用该接线方式的柔性直流输电工程是连接纳米比亚和赞比亚之间的卡普里维工程。

发明内容

[0006] 针对现有技术的以上缺陷或改进需求，本发明提供了一种基于单极对称接线配置

下的MMC-HVDC系统直流侧单极接地故障的非对称运行控制方法，在隔离直流侧单极接地故障的同时还能继续传输一半的额定有功功率并且为交流系统提供无功支撑，故障期间换流器不需要退出运行，系统恢复速度快，提高了单极对称接线配置下MMC-HVDC系统对直流侧单极接地故障的主动防御能力。

[0007] 2、为实现上述目的，本发明提供了一种MMC-HVDC系统的直流侧单极接地故障的非对称运行控制方法，所述MMC-HVDC系统中MMC换流器各桥臂具备负电平输出能力，且桥臂的最小负电平输出能力能达到额定直流电压的一半，其特征在于，所述方法包括如下步骤：

[0008] (1)检测判断直流侧是否发生单极接地故障，是则顺序执行步骤(2)，否则继续检测；

[0009] (2)控制直流侧电压U_{dc}至额定值U_{dc0}的一半，调整故障极桥臂输出电压中的直流分量为0，调整非故障极桥臂输出电压中的直流分量为额定直流电压的一半，以消除过电压与故障电流；

[0010] (3)根据系统要求传输的有功功率和无功功率指令，确定换流器输出三相内电势的参考值e_j，同时根据换流器三相上桥臂总能量ΣW_{pj}和三相下桥臂总能量ΣW_{nj}之差，调整三相上、下桥臂输出电压的相角，进而调整三相上、下桥臂输出电压参考值，使非故障极桥臂和故障极桥臂在传输不同功率的同时维持桥臂子模块电容电压的相对平衡，其中，下标j=a，b，c，分别表示a、b、c三相；

[0011] (4)在故障极桥臂中注入较小的直流电压分量，判断交流系统接地点是否有故障电流或者接地电阻是否产生压降，是则返回步骤(2)，否则说明单极接地故障已消除，系统恢复正常运行。

[0012] 优选地，所述步骤(3)中，换流器三相上桥臂总能量$\sum W_{pj}=\frac{C_0}{2}\sum_{i=1}^{3N}\left(u_{cp_i}\right)^2$，换流器三相下桥臂总能量$\sum W_{nj}=\frac{C_0}{2}\sum_{i=1}^{3N}\left(u_{cn_i}\right)^2$，其中，$C_0$为桥臂子模块电容值，N为每相桥臂的子模块个数，$u_{cp_i}$为上桥臂第i个子模块电容电压，$u_{cn_i}$为下桥臂第i个子模块电容电压。

[0013] 优选地，在负极线路发生单极接地故障时，下桥臂为故障极桥臂，上桥臂为非故障极桥臂，将三相上桥臂输出电压参考值调整至$u_{pj_ref}=\frac{U_{dc0}}{2}-e_j\sin(\omega t+\varphi+\Delta\delta)$，将三相下桥臂输出电压参考值调整至$u_{nj_ref}=e_j\sin(\omega t+\varphi-\Delta\delta)$；在正极线路发生单极接地故障时，上桥臂为故障极桥臂，下桥臂为非故障极桥臂，将三相上桥臂输出电压参考值调整至$u_{pj_ref}=-e_j\sin(\omega t+\varphi+\Delta\delta)$，将三相下桥臂输出电压参考值调整至$u_{nj_ref}=\frac{U_{dc0}}{2}+e_j\sin(\omega t+\varphi-\Delta\delta)$；其中，ω是交流系统的额定频率，t为时间，$\varphi$为换流器输出内电势的初始相位，Δδ为上、下桥臂输出电压的相角调整量。

[0014] 总体而言，通过本发明所构思的以上技术方案与现有技术相比，具有以下有益效果：对于实际工程中广泛应用的基于单极对称接线的MMC-HVDC系统，建设成本小，配套设备技术要求低，发生直流侧单极接地故障之后，不需要闭锁换流器，通过将故障极桥臂输出电压直流分量设置为零即可快速消除交、直流侧过电压和故障电流，从而消除对交、直流侧的

绝缘威胁;通过调整不同桥臂电压交流分量的相角,使得系统在隔离直流侧单极接地故障的同时还能继续传输一半的额定有功功率并且为交流系统提供无功支撑,对所连接的交、直流系统稳定性有积极意义;故障期间换流器不需要退出运行,系统恢复速度快,整个过程换流器处于受控状态,提高了单极对称接线配置下MMC-HVDC系统对直流侧单极接地故障的主动防御能力。

附图说明

[0015] 图1是交流侧并联星形电抗外加电阻接地的单极MMC-HVDC系统结构图;

[0016] 图2是交流侧联结变压器Y绕组经接地电阻接地的单极MMC-HVDC系统结构图;

[0017] 图3是直流侧并联钳位电阻接地的单极MMC-HVDC系统结构图;

[0018] 图4是双极对称接线的MMC-HVDC系统结构图;

[0019] 图5是本发明实施例的基于单极对称接线配置下的MMC-HVDC系统直流侧单极接地故障非对称运行控制方法流程图;

[0020] 图6是单极接地故障非对称运行期间上下桥臂输出电压相角修正框图;

[0021] 图7是基于MMC-HVDC系统单极接地故障整流侧非对称运行控制原理框图;

[0022] 图8是基于MMC-HVDC系统单极接地故障逆变侧非对称运行控制原理框图;

[0023] 图9是全桥子模块和半桥子模块组成的混合型MMC结构图;

[0024] 图10是交流侧并联星形电抗外加电阻接地的MMC-HVDC系统单极接地故障后的简化等效电路;

[0025] 图11是MMC-HVDC系统单极接地故障检测期间交流侧接地电阻压降波形;

[0026] 图12是本发明实施例1交流侧并联星形电抗外加电阻接地的MMC-HVDC系统单极接地故障非对称运行期间的仿真效果图,其中,(a)为换流器交流侧三相电压随时间的变化图,(b)为换流器交流侧三相电流随时间的变化图,(c)为换流器直流侧正负极母线电压随时间的变化图,(d)为换流器直流侧电流随时间的变化图,(e)为换流器传输的无功功率随时间的变化图;(f)为换流器传输的有功功率随时间的变化图,(g)为A相上桥臂子模块电容电压随时间变化图,(h)为A相下桥臂子模块电容电压随时间变化图;

[0027] 图13是本发明实施例1交流侧并联星形电抗外加电阻接地的MMC-HVDC系统单极接地故障非对称运行期间的仿真效果图,其中,(a)为A相上下桥臂输出电压随时间的变化图,(b)为A相上下桥臂电流随时间的变化图;

[0028] 图14是交流侧联结变压器Y绕组外加电阻接地的MMC-HVDC系统单极接地故障后的简化等效电路;

[0029] 图15是本发明实施例2交流侧联结变压器Y绕组经接地电阻接地的MMC-HVDC系统单极接地故障非对称运行期间的仿真效果图,其中,(a)为换流器交流侧三相电压随时间的变化图,(b)为换流器交流侧三相电流随时间的变化图,(c)为换流器直流侧正负极母线电压随时间的变化图,(d)为换流器直流侧电流随时间的变化图,(e)为换流器传输的无功功率随时间的变化图,(f)为换流器传输的有功功率随时间的变化图,(g)为A相上桥臂子模块电容电压随时间变化图,(h)为A相下桥臂子模块电容电压随时间变化图;

[0030] 图16是本发明实施例2交流侧联结变压器Y绕组经接地电阻接地的MMC-HVDC系统单极接地故障非对称运行期间的仿真效果图,其中,(a)为A相上下桥臂输出电压随时间的

变化图，(b)为A相上下桥臂电流随时间的变化图；

[0031] 图17是直流侧并联钳位电阻接地的MMC-HVDC系统单极接地故障后的简化等效电路；

[0032] 图18是本发明实施例3直流侧并联钳位电阻接地的MMC-HVDC系统单极接地故障非对称运行期间的仿真效果图，其中，(a)为换流器交流侧三相电压随时间的变化图，(b)为换流器交流侧三相电流随时间的变化图，(c)为换流器直流侧正负极母线电压随时间的变化图，(d)为换流器直流侧电流随时间的变化图，(e)为换流器传输的无功功率随时间的变化图，(f)为换流器传输的有功功率随时间的变化图，(g)为A相上桥臂子模块电容电压随时间变化图，(h)为A相下桥臂子模块电容电压随时间变化图；

[0033] 图19是本发明实施例3直流侧并联钳位电阻接地的MMC-HVDC系统单极接地故障非对称运行期间的仿真效果图，其中，(a)为A相上下桥臂输出电压随时间的变化图，(b)为A相上下桥臂电流随时间的变化图。

具体实施方式

[0034] 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。

[0035] 本发明实施例的MMC-HVDC系统直流侧单极接地故障的非对称运行控制方法流程图如图5所示，MMC-HVDC系统中MMC换流器各桥臂具备负电平输出能力，且桥臂的最小负电平输出能力能达到额定直流电压的一半，目前符合要求的换流器结构包括基于全桥子模块的MMC换流器、混合型MMC换流器、基于箝位双子模块的MMC换流器等。该方法包括如下步骤：

[0036] (1)检测判断直流侧是否发生单极接地故障，是则顺序执行步骤(2)，否则继续检测；

[0037] (2)控制直流侧电压U_{dc}至额定值U_{dc0}的一半，调整故障极桥臂输出电压中的直流分量为0，调整非故障极桥臂输出电压中的直流分量为额定直流电压的一半，以消除过电压与故障电流；

[0038] (3)根据系统要求传输的有功功率和无功功率指令，确定换流器输出三相内电势的参考值e_j，同时根据换流器三相上桥臂总能量ΣW_{pj}和换流器三相下桥臂总能量ΣW_{nj}之差，调整三相上、下桥臂输出电压的相角，如图6所示，进而调整三相上、下桥臂输出电压参考值，使非故障极桥臂和故障极桥臂在传输不同功率的同时维持桥臂子模块电容电压的相对平衡，其中，下标j＝a，b，c，分别表示a、b、c三相；

[0039] 在负极线路发生单极接地故障时，下桥臂为故障极桥臂，上桥臂为非故障极桥臂，将三相上桥臂输出电压参考值调整至$u_{pj_ref}=\frac{U_{dc0}}{2}-e_j\sin(\omega t+\varphi+\Delta\delta)$，将三相下桥臂输出电压参考值调整至$u_{nj_ref}=e_j\sin(\omega t+\varphi-\Delta\delta)$；在正极线路发生单极接地故障时，上桥臂为故障极桥臂，下桥臂为非故障极桥臂，将三相上桥臂输出电压参考值调整至$u_{pj_ref}=-e_j\sin(\omega t+\varphi+\Delta\delta)$，将三相下桥臂输出电压参考值调整至$u_{nj_ref}=\frac{U_{dc0}}{2}+e_j\sin(\omega t+\varphi-\Delta\delta)$；

其中，ω是交流系统的额定频率，t为时间，φ为换流器输出内电势的初始相位，Δδ为上下桥臂输出电压的相角调整量。图6中δ_p'表示上桥臂输出电压中调整后的相位，δ_n'表示下桥臂输出电压调整后的相位。

[0040] 具体地，换流器三相上下桥臂总能量ΣW_{pj}和ΣW_{nj}分别为：

[0041] $$\sum W_{pj}=\frac{C_0}{2}\sum_{i=1}^{3N}\left(u_{cp_i}\right)^2$$

[0042] $$\sum W_{nj}=\frac{C_0}{2}\sum_{i=1}^{3N}\left(u_{cn_i}\right)^2$$

[0043] 其中，C_0为桥臂子模块电容值，N为每相桥臂的子模块个数，u_{cp_i}为上桥臂第i个子模块电容电压，u_{cn_i}为下桥臂第i个子模块电容电压。单极接地故障期间，换流器作为整流器的整体控制框图如图7所示，作为逆变器时的整体控制框图如图8所示。

[0044] (4)在故障极桥臂中注入较小的直流电压分量(大小约为子模块额定电压的一半，1kV左右)，判断交流系统接地点是否有故障电流或者接地电阻是否产生压降，是则返回步骤(2)，否则说明单极接地故障已消除，系统恢复正常运行。

[0045] 为使本领域技术人员更好地理解本发明，下面结合具体实施例对本发明的基于单极对称接线配置下的MMC-HVDC系统直流侧单极接地故障的非对称运行控制方法进行详细说明。

[0046] 下述各实施例中，均以混合型MMC换流器结构为例，其结构如图9所示，其每相桥臂由全桥子模块和半桥子模块组成，半桥子模块能够输出两种电平：正电平和零电平；全桥子模块能够输出三种电平：正电平、负电平和零电平。每相上桥臂或每相下桥臂中，全桥子模块和半桥子模块的个数比为1:1，均为5个，子模块电容电压比为1:1，均为2kV。基于混合型MMC的HVDC系统正常运行时的直流侧额定电压U_{dc0}＝20kV，传输额定有功功率为20MW，无功功率为4MVAR，发生的单极接地故障均以负极线路接地为例。

[0047] 实施例1

[0048] 对于交流侧并联电抗外加电阻接地方式的MMC-HVDC系统，负极线路发生单极接地故障后，将各桥臂等效为可控电压源，则交流侧接地极、子模块电容和直流侧故障接地点组成故障回路，如图10中虚线所示。

[0049] 根据基尔霍夫电压定律，可以推导出如下关系式：

[0050] $$\begin{cases}\left(R_g+R_f\right)I_{fault}+(L_g+L)\dfrac{dI_{faultA}}{dt}+RI_{faultA}=e_{va}+U_{dc}/2\\ \left(R_g+R_f\right)I_{fault}+(L_g+L)\dfrac{dI_{faultB}}{dt}+RI_{faultB}=e_{vb}+U_{dc}/2\\ \left(R_g+R_f\right)I_{fault}+(L_g+L)\dfrac{dI_{faultC}}{dt}+RI_{faultC}=e_{vc}+U_{dc}/2\end{cases}$$

[0051] 根据基尔霍夫电流定律，可以推导出如下关系式：

[0052] $I_{fault}=I_{faultA}+I_{faultB}+I_{faultC}$

[0053] 由上面的式子最终可以得到：

[0054] $$\left(R_g+R_f+\frac{R}{3}\right)I_{fault}+\frac{(L_g+L)}{3}\frac{dI_{fault}}{dt}=U_{dc}/2$$

[0055] 当故障发生之后至稳态时，其中正负极母线电压分别为：

[0056] $$\begin{cases}U_{dcP}=U_{dc0}-0.5U_{dc}\dfrac{R_f}{\left(R_g+R_f+R/3\right)}\\ U_{dcN}=-0.5U_{dc}\dfrac{R_f}{\left(R_g+R_f+R/3\right)}\end{cases}$$

[0057] 此时换流器的交流侧三相出口电压V_a、V_b、V_c表示为：

[0058] $$\begin{cases}V_a=e_{va}+U_{dc}/2+U_{dcN}\\ V_b=e_{vb}+U_{dc}/2+U_{dcN}\\ V_c=e_{vc}+U_{dc}/2+U_{dcN}\end{cases}$$

[0059] 其中，I_{fault}为故障点的故障电流，I_{faultA}、I_{faultB}、I_{faultC}分别为流经为故障点的故障电流，R_f为故障电阻，R_g为交流测接地电阻，L为桥臂电抗，L_g为交流测接地电抗，U_{dcP}和U_{dcN}分别为正、负极直流母线对地电压。由于直流侧故障电阻R_f远小于交流测接地电阻R_g，由U_{dcP}的表达式可以推算出单极接地故障下，正、负极直流母线电压约为U_{dc0}和0，则正极直流母线电压U_{dcP}约上升一倍；由交流侧各相电压表达式可知，换流器交流侧输出电压出现了一半额定直流电压的直流偏置；同时故障电流流过下桥臂会使下桥臂子模块电容放电。由上分析可知，发生单极接地故障之后，对交、直流系统的绝缘以及换流器自身的稳定运行都存在着巨大的威胁。

[0060] 假设在1.0S时，检测到交流侧并联星形电抗外加电阻接地的HVDC系统直流侧负极母线发生接地故障。直流电压变为10kV，根据所连交流系统和直流线路稳定性需求，设置混合型MMC所需传输的有功功率指令值为10MW，无功功率指令值为4MVAR，得到直流侧单极接地故障时MMC每相所需输出的内电势参考值e_j；计算各相上、下桥臂输出电压参考值分别为：

[0061] $$u_{pj_ref}=\frac{U_{dc0}}{2}-e_j\sin(\omega t+\varphi+\Delta\delta)$$

[0062] $$u_{nj_ref}=e_j\sin(\omega t+\varphi-\Delta\delta)$$

[0063] 结合当前各子模块电压，得到各子模块的投切信号；3.0s时检测到直流电压恢复到额定值：将混合型MMC的所需传输的有功功率和无功功率设置成正常运行值，即传输有功功率20MW，无功功率4MVAR，重新计算u_{pj_ref}和u_{nj_ref}。根据交流侧接地电阻两端电压降VR是否为零来判断单极接地故障是否清除，分别在1.0s、2.0s、3.0s在故障桥臂中注入较小的直流分量，波形如图11所示，结果表明，在故障未清除之前，交流侧接地电阻压降不为零；当故障清除之后，交流侧接地电阻压降为零。

[0064] 直流侧单极接地故障非对称运行及恢复期间，换流器交流侧三相交流电压、电流随时间的变化分别如图12(a)、12(b)所示，结果表明故障期间换流器在不闭锁的同时能够隔离直流侧故障，保持交流侧电压的稳定；直流侧正负极母线电压如图12(c)所示，结果表

明非故障极直流母线电压维持故障前电压值，故障极直流母线电压变为零，不会出现过电压；换流器传输的无功功率和有功功率随时间变化分别如图12(e)、12(f)所示，结果表明单极接地故障期间，无功功率和有功功率均可控，换流器能够根据系统要求向电网提供无功支撑，并且能继续传输一半的额定有功功率；换流器A相上下桥臂子模块电容电压随时间的变化如图12(g)、12(h)所示，结果表明在单极接地故障期间，对上下桥臂的输出电压进行相角修正之后，上下桥臂能在传输不同的功率的同时维持子模块电容电压的相对平衡。A相上下桥臂输出电压和桥臂电流分别如图13(a)、13(b)所示，结果表明在非对称运行期间，故障极桥臂输出电压中不包含直流分量，子模块需要具备负电平输出能力，非故障极桥臂输出电压包含直流分量，输出电压恒为正值，由于上下桥臂传输功率不同，此时上下桥臂电流也不再对称。

[0065] 实施例2

[0066] 对于交流侧变压器Y绕组外加电阻接地的MMC-HVDC系统在发生单极接地故障之后，故障通路如图14虚线所示，与图10交流侧并联电抗器外加电阻的接地方式相似。同样根据基尔霍夫电压电流定律，可以推导出发生负极母线单极接地故障之后，稳态时，正、负极直流母线电压为：

[0067]
$$\begin{cases} U_{dcP} = U_{dc0} - 0.5U_{dc}\dfrac{R_f}{\left(R_g + R_f + R/3\right)} \approx U_{dc0} \\ U_{dcN} = -0.5U_{dc}\dfrac{R_f}{\left(R_g + R_f + R/3\right)} \approx 0 \end{cases}$$

[0068] 同理，此时换流器的交流侧三相出口电压V_a、V_b、V_c表示为：

[0069]
$$\begin{cases} V_a = e_{va} + U_{dc}/2 + U_{dcN} \\ V_b = e_{vb} + U_{dc}/2 + U_{dcN} \\ V_c = e_{vc} + U_{dc}/2 + U_{dcN} \end{cases}$$

[0070] 直流侧正负极母线电压与交流侧出口电压在稳态时满足的关系与实施例1中交流侧并联电抗器外加电阻接地方式发生单极接地故障之后一致。

[0071] 假设在1.0S时，检测到交流侧联结变压器Y绕组外加大电阻接地的MMC-HVDC系统直流侧负极母线发生接地故障。直流电压变为10kV，根据所连交流系统和直流线路稳定性需求，设置混合型MMC所需传输的有功功率指令值为10MW，无功功率指令值为4MVAR，得到直流侧单极接地故障时MMC每相所需输出的内电势参考值e_j；计算各相上下桥臂输出电压参考值分别为：

[0072]
$$u_{pj_ref} = \frac{U_{dc0}}{2} - e_j \sin(\omega t + \varphi + \Delta\delta)$$

[0073]
$$u_{nj_ref} = e_j \sin(\omega t + \varphi - \Delta\delta)$$

[0074] 结合当前各子模块电压，得到各子模块的投切信号；3.0s时检测到直流电压恢复到额定值：将混合型MMC的所需传输的有功功率和无功功率设置成正常运行值，即传输有功功率20MW，无功功率4MVAR，重新计算u_{pj_ref}和u_{nj_ref}。

[0075] 直流侧单极接地故障非对称运行及恢复期间，换流器交流侧三相交流电压、电流

随时间的变化分别如图15(a)、15(b)所示，结果表明故障期间换流器在不闭锁的同时能够隔离直流侧故障，保持交流侧电压的稳定；直流侧正负极母线电压如图15(c)所示，结果表明非故障极直流母线电压维持故障前电压值，故障极直流母线电压变为零，不会出现过电压；换流器传输的无功功率和有功功率随时间变化分别如图15(e)、15(f)所示，结果表明单极接地故障期间，无功功率和有功功率均可控，换流器能够根据系统要求向电网提供无功支撑，并且能继续传输一半的额定有功功率；换流器A相上下桥臂子模块电容电压随时间的变化如图15(g)、15(h)所示，结果表明在单极接地故障期间，对上下桥臂的输出电压进行相角修正之后，上下桥臂能在传输不同的功率的同时维持子模块电容电压的相对平衡。A相上下桥臂输出电压和桥臂电流分别如图16(a)、16(b)所示，结果表明在非对称运行期间，故障极桥臂输出电压中不包含直流分量，子模块需要具备负电平输出能力，非故障极桥臂输出电压包含直流分量，输出电压恒为正值，由于上下桥臂传输功率不同，此时上下桥臂电流也不再对称。

[0076] 实施例3

[0077] 对于直流侧并联箝位大电阻接地的MMC-HVDC系统，当单极接地故障发生时，简化等效电路如图17所示，接地点由位置①转变为位置②。由于直流侧所并联的电阻阻值极大，近似开路，各模块电容不存在与故障接地点的放电通路，电容电压维持稳定，电容电流分量与故障前保持一致，同样由于接地点的改变，换流器交流侧电压此时相当于承受的是下桥臂的电压，出现一半额定直流电压的直流偏置。非故障极直流线路此时承担全部的直流电压，比故障前上升一倍，由此可见直流侧单极接地故障对交流侧和直流侧非故障极造成严重的绝缘威胁。

[0078] 假设在1.0S时，检测到直流侧并联钳位电阻接地的MMC-HVDC系统直流侧负极母线发生接地故障。直流电压变为10kV，根据所连交流系统和直流线路稳定性需求，设置混合型MMC所需传输的有功功率指令值为10MW，无功功率指令值为4MVAR，得到直流侧单极接地故障时MMC每相所需输出的内电势参考值e_j；计算各相上下桥臂输出电压参考值分别为：

[0079] $$u_{pj_ref}=\frac{U_{dc0}}{2}-e_j\sin(\omega t+\varphi+\Delta\delta)$$

[0080] $$u_{nj_ref}=e_j\sin(\omega t+\varphi-\Delta\delta)$$

[0081] 结合当前各子模块电压，得到各子模块的投切信号；3.0s时检测到直流电压恢复到额定值：将混合型MMC的所需传输的有功功率和无功功率设置成正常运行值，即传输有功功率20MW，无功功率4MVAR，重新计算u_{pj_ref}和u_{nj_ref}。

[0082] 直流侧单极接地故障非对称运行及恢复期间，换流器交流侧三相交流电压、电流随时间的变化分别如图18(a)、18(b)所示，结果表明故障期间换流器在不闭锁的同时能够隔离直流侧故障，保持交流侧电压的稳定；直流侧正负极母线电压如图18(c)所示，结果表明发生非故障极直流母线电压维持故障前电压值，故障极直流母线电压变为零，不会出现过电压；换流器传输的无功功率和有功功率随时间变化分别如图18(e)、18(f)所示，结果表明单极接地故障期间，无功功率和有功功率均可控，换流器能够根据系统要求向电网提供无功支撑，并且能继续传输一半的额定有功功率；换流器A相上下桥臂子模块电容电压随时间的变化如图18(g)、18(h)所示，结果表明在单极接地故障期间，对上下桥臂的输出电压进行相角修正之后，上下桥臂能在传输不同的功率的同时维持子模块电容电压的相对平衡。A

相上下桥臂输出电压和桥臂电流分别如图19a)、19(b)所示，结果表明在非对称运行期间，故障极桥臂输出电压中不包含直流分量，子模块需要具备负电平输出能力，非故障极桥臂输出电压包含直流分量，输出电压恒为正值，由于上下桥臂传输功率不同，此时上下桥臂电流也不再对称。

[0083] 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。

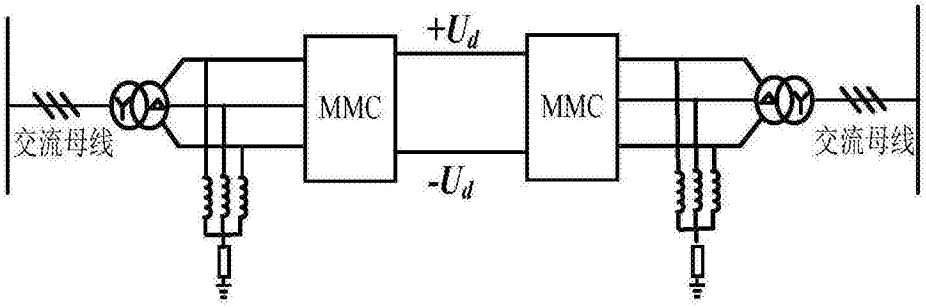

+Ud
MMC
MMC
交流母线
交流母线
-Ud

图1

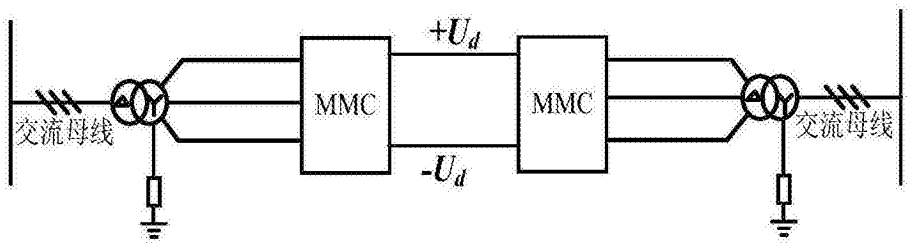

+Ud
MMC
MMC
交流母线
交流母线
-Ud

图2

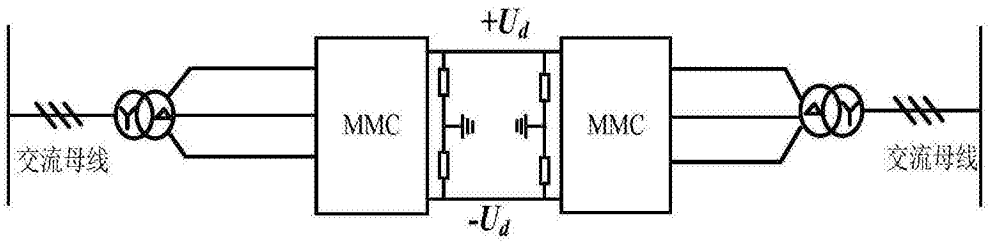

+Ud
MMC
MMC
交流母线
交流母线
-Ud

图3

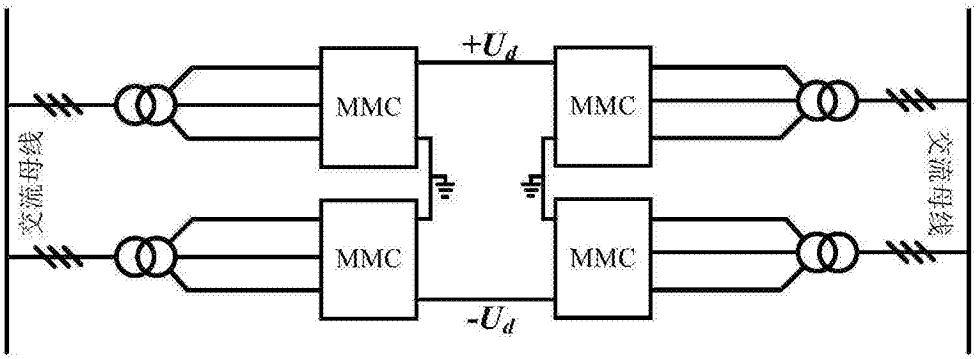

+Ud
MMC
MMC
MMC
MMC
交流母线
交流母线
-Ud

图4

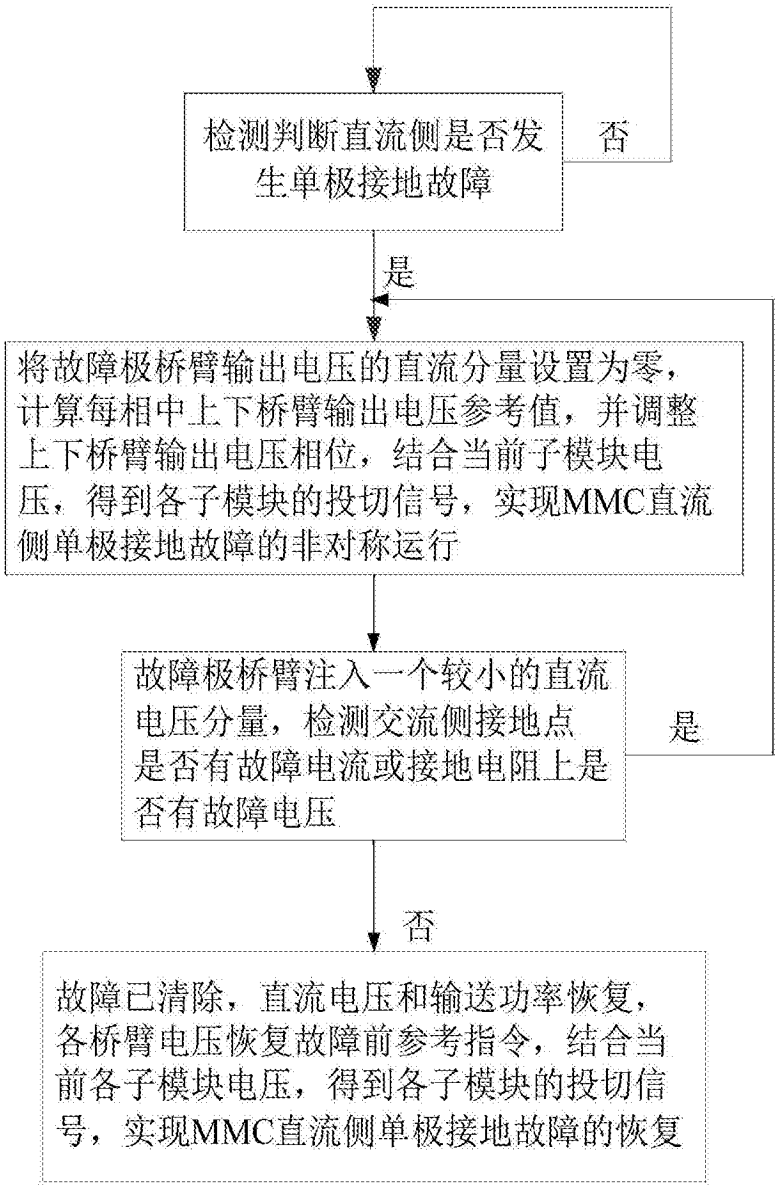

检测判断直流侧是否发生单极接地故障
否
是
将故障极桥臂输出电压的直流分量设置为零，计算每相中上下桥臂输出电压参考值，并调整上下桥臂输出电压相位，结合当前子模块电压，得到各子模块的投切信号，实现MMC直流侧单极接地故障的非对称运行
故障极桥臂注入一个较小的直流电压分量，检测交流侧接地点是否有故障电流或接地电阻上是否有故障电压
是
否
故障已清除，直流电压和输送功率恢复，各桥臂电压恢复故障前参考指令，结合当前各子模块电压，得到各子模块的投切信号，实现MMC直流侧单极接地故障的恢复

图5

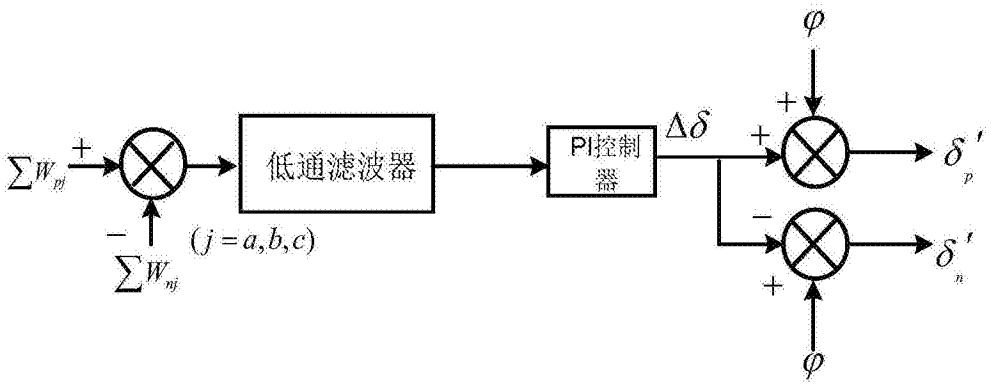

$\sum W_{pj}$
+
−
$\sum W_{nj}$
$(j=a,b,c)$
低通滤波器
PI控制器
$\Delta\delta$
φ
+
+
−
+
δ'_p
δ'_n
φ

图6

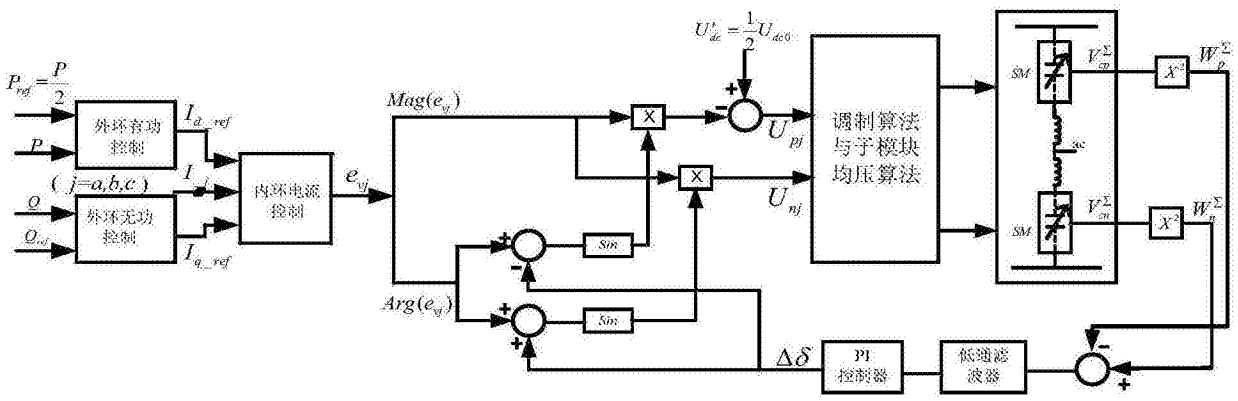

外环有功控制
外环无功控制
内环电流控制
调制算法与子模块均压算法
PI控制器
低通滤波器
SM
SM
Sin
Sin

图7

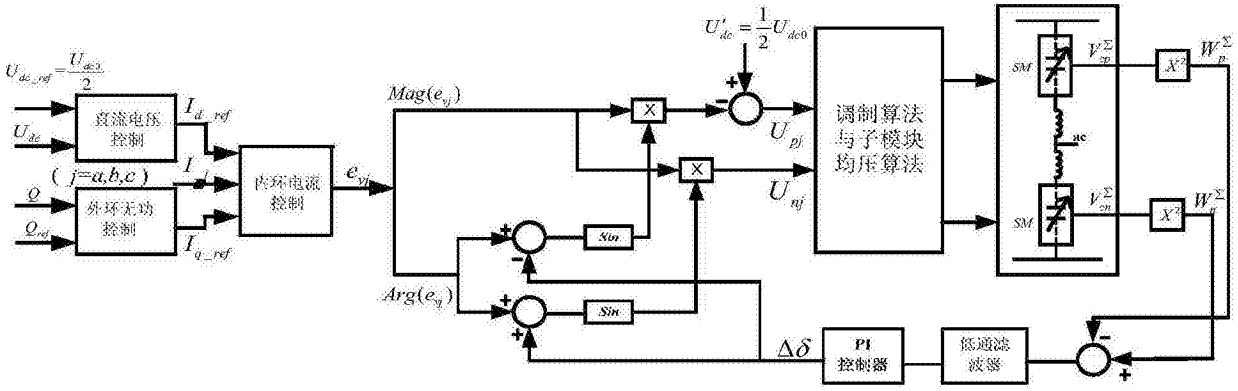

直流电压控制
外环无功控制
内环电流控制
调制算法与子模块均压算法
PI控制器
低通滤波器
SM
SM
Sin
Sin

图8

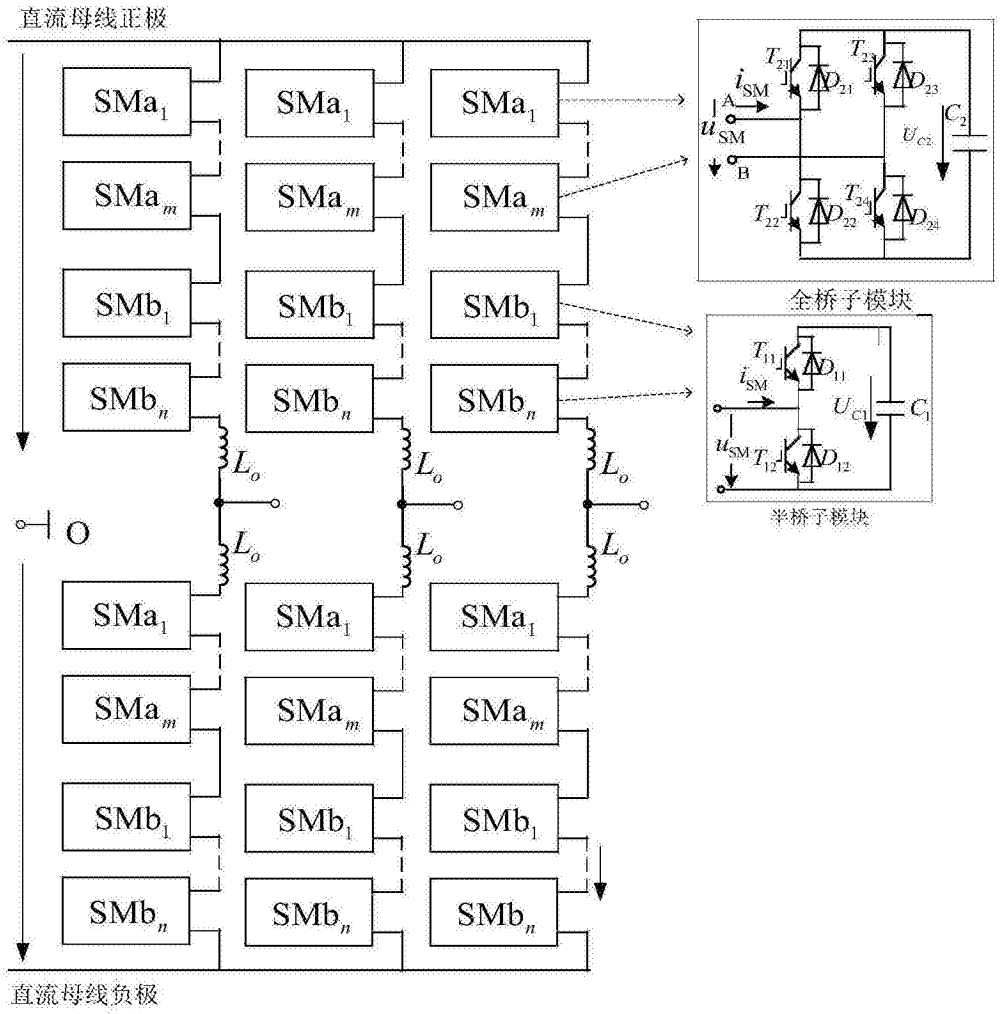

直流母线正极
SMa1
SMam
SMb1
SMbn
Lo
O
直流母线负极
全桥子模块
半桥子模块
T21
T23
T22
T24
D21
D23
D22
D24
C2
UC2
iSM
uSM
A
B
T11
T12
D11
D12
C1
UC1

图9

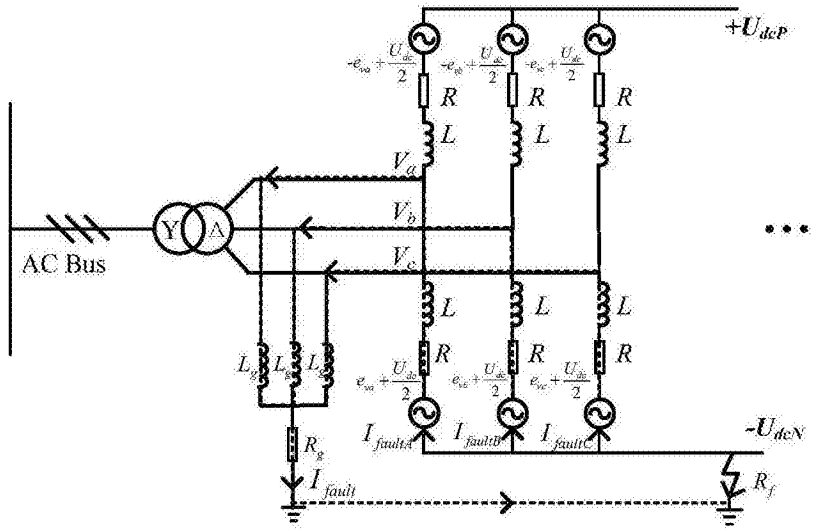

+UdcP
-UdcN
AC Bus
Y
Δ
R
L
Va
Vb
Vc
Lg
Rg
Ifault
Rf
IfaultA
IfaultB
IfaultC

图10

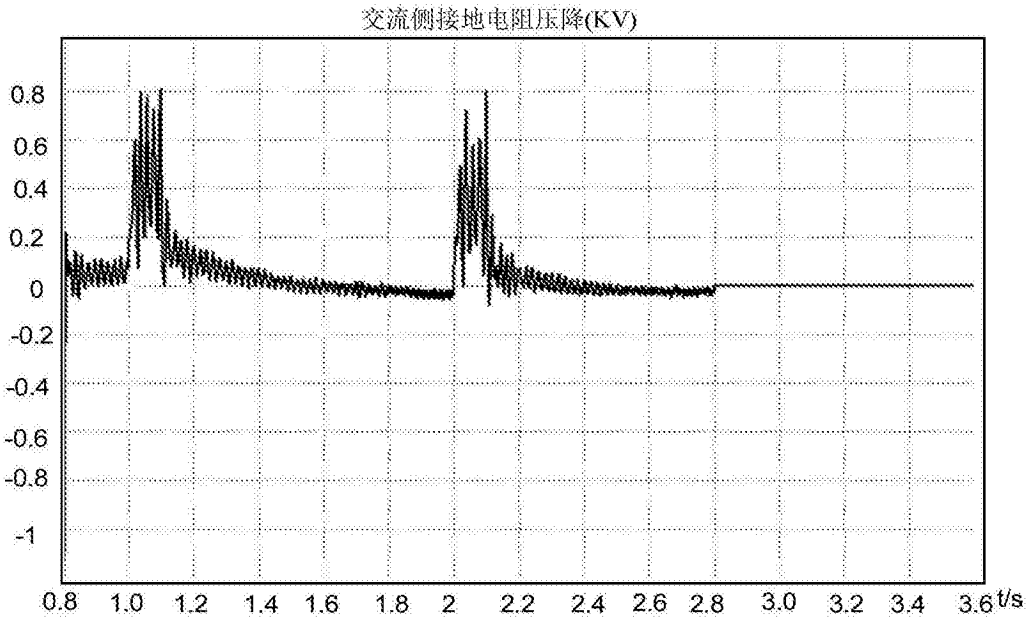

交流侧接地电阻压降(KV)
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1
0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2 2.2 2.4 2.6 2.8 3.0 3.2 3.4 3.6 t/s

图11

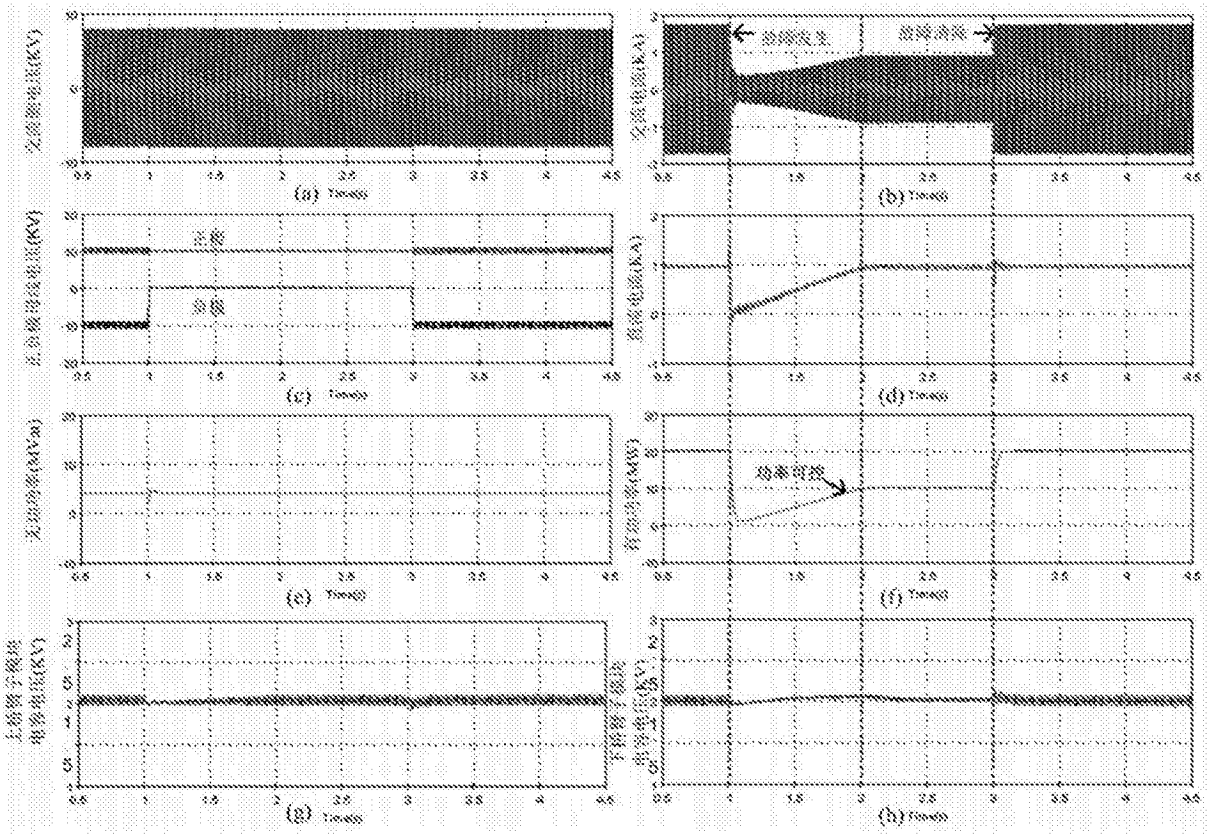


图12

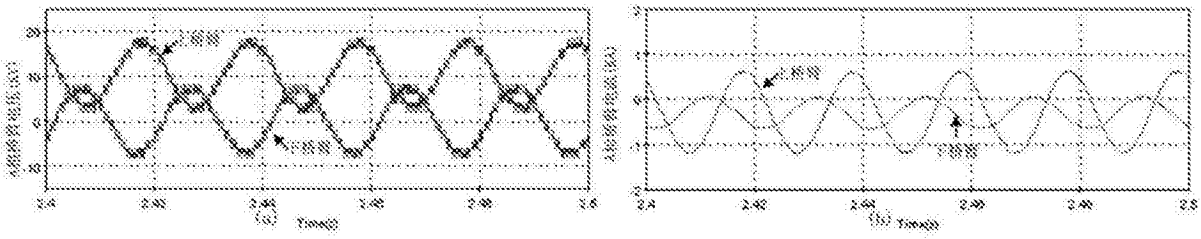


图13

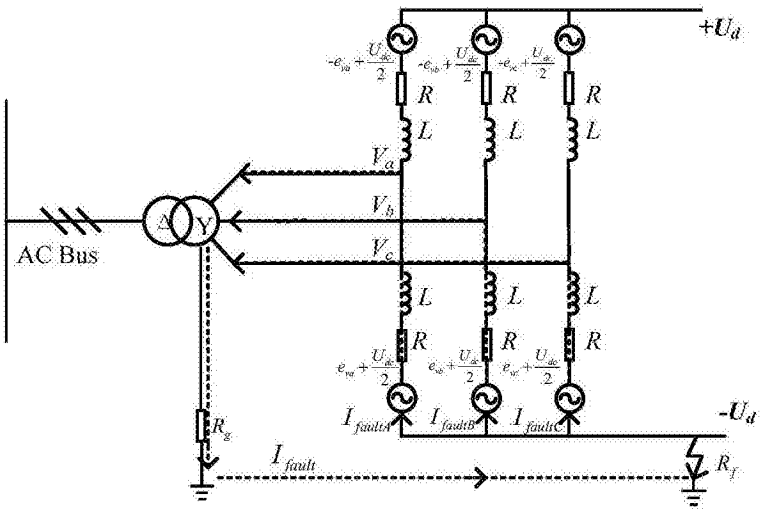


图14

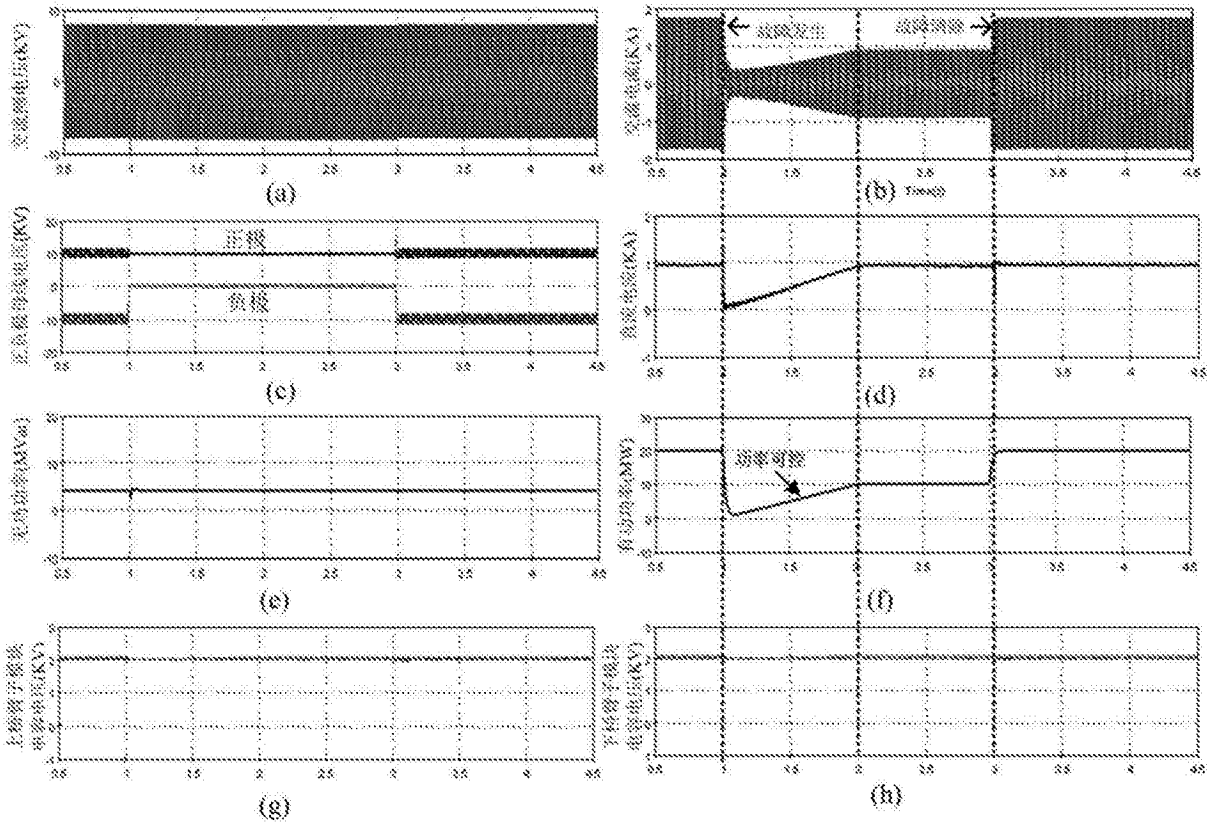


图15

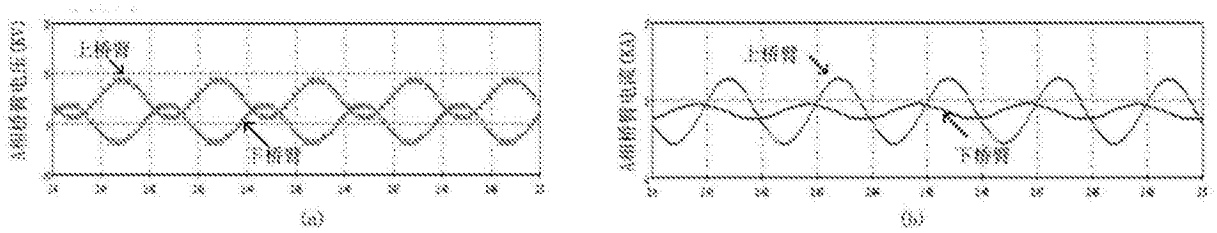


图16

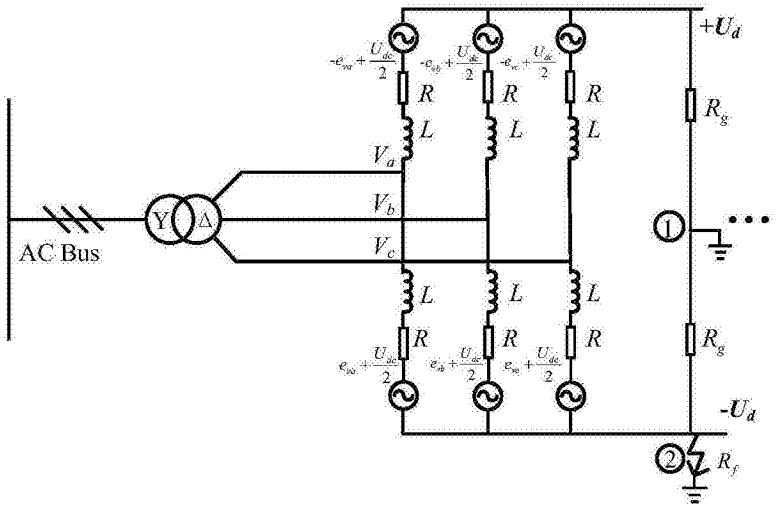


图17

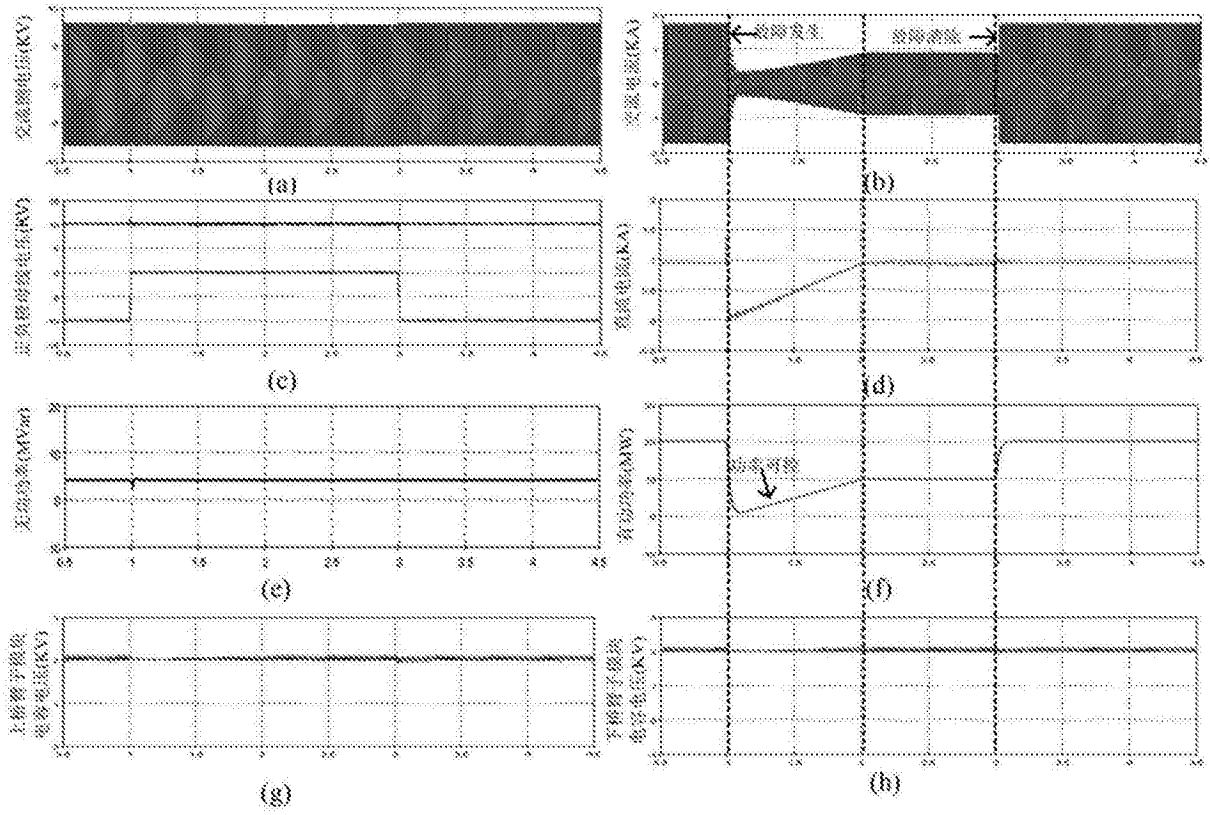


图18

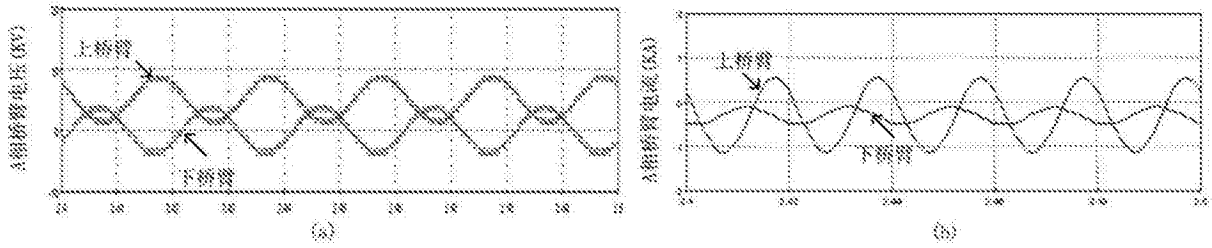


图19