



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104753043 B

(45)授权公告日 2017.05.17

(21)申请号 201510141886.6

审查员 余细雨

(22)申请日 2015.03.27

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104753043 A

(43)申请公布日 2015.07.01

(73)专利权人 山东大学

地址 250061 山东省济南市历下区经十路
17923号

(72)发明人 李可军 孟新涵 王卓迪 孙莹

(74)专利代理机构 济南圣达知识产权代理有限公司 37221

代理人 张勇

(51)Int.Cl.

H02H 7/26(2006.01)

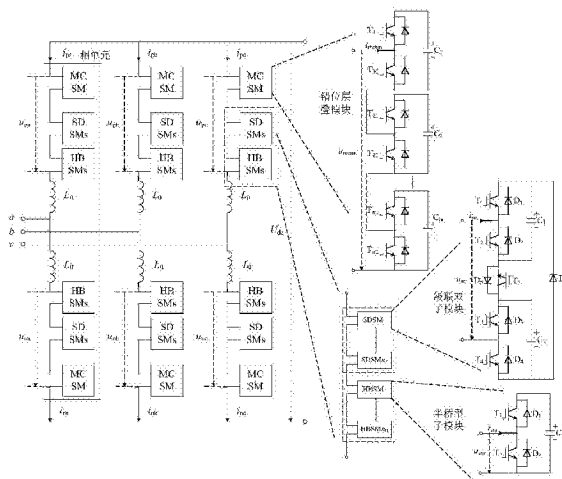
权利要求书2页 说明书6页 附图5页

(54)发明名称

一种具有直流故障穿越能力的多电平换流器及工作方法

(57)摘要

本发明公开了具有直流故障穿越能力的混合型多电平换流器及工作方法,该换流器基于错位层叠理论,包括三相桥式整流电路;三相桥式整流电路的每个桥臂均包括相互级联的错位层叠模块、级联双子模块组、半桥型子模块组以及电抗器;故障发生时换流器闭锁前的放电过程是一个已知初始条件的振荡放电过程,闭锁后由于桥臂等效电容值发生变化,当且仅当任何回路状态下桥臂级联电容所提供的反向电压始终大于交流线电压幅值时,利用二极管反相阻断特性使短路电流下降为零,清除直流故障。通过闭锁换流器自限制清除直流故障电流,无需额外配备高压直流断路器,适用于普通架空线路,可应用于多端直流网络构建、新能源并网、无源网络供电等领域。



CN 104753043 B

1. 一种具有直流故障穿越能力的多电平换流器,其特征是,包括三相桥式整流电路;所述三相桥式整流电路的每个桥臂均包括相串联的错位层叠模块、级联双子模块组、半桥型子模块组以及电抗器;所述错位层叠模块、级联双子模块组、半桥型子模块组为相互级联的结构;所述故障发生时换流器闭锁前的放电过程是一个已知初始条件的振荡放电过程,闭锁后由于桥臂等效电容值发生变化,当且仅当任何回路状态下桥臂级联电容所提供的反向电压始终大于交流线电压幅值时,利用二极管反相阻断特性使短路电流下降为零,清除直流故障。

2. 如权利要求1所述的一种具有直流故障穿越能力的多电平换流器,其特征是,所述错位层叠模块由 m 个半桥单元串联构成;每个半桥单元包括2个IGBT即第一IGBT及第二IGBT、2个反向二极管以及1个电容器;所述2个IGBT分别和相应的2个反向二极管并联组成2组可控开关;第一IGBT的发射极和第二IGBT的集电极相连;电容器的正极和第一IGBT的集电极相连,电容器的负极和第二IGBT的发射极相连。

3. 如权利要求1所述的一种具有直流故障穿越能力的多电平换流器,其特征是,所述级联双子模块组由 n_s 个级联双子模块串联构成;每个级联双子模块包括5个IGBT即 $T_1 \sim T_5$ 、5个反向二极管即 $D_1 \sim D_5$ 、2个电容器即 $C_1 \sim C_2$ 以及1个箝位二极管 D_6 ;所述5个IGBT分别和相应的5个反向二极管并联组成5组可控开关;所述 T_1 的发射极和 T_2 的集电极相连, T_3 的发射极和 T_4 的集电极相连, T_2 的发射极和 T_5 的发射极相连, T_3 的集电极和 T_5 的集电极相连;所述电容器 C_1 的正极分别与 T_1 的集电极、二极管 D_6 的负极相连,电容器 C_1 的负极和 T_2 的发射极相连;所述电容器 C_2 的负极分别与 T_4 的发射极、二极管 D_6 的正极相连,电容器 C_2 的正极和 T_3 的集电极相连。

4. 如权利要求1所述的一种具有直流故障穿越能力的多电平换流器,其特征是,所述半桥型子模块组由 n_H 个半桥型子模块串联构成;每个半桥型子模块包括2个IGBT即第三IGBT及第四IGBT、2个反向二极管以及1个电容器;所述2个IGBT分别和相应的2个反向二极管并联组成2组可控开关;所述第三IGBT的发射极和第四IGBT的集电极相连;所述电容器的正极和第三IGBT的集电极相连,电容器的负极和第四IGBT的发射极相连。

5. 如权利要求2所述的一种具有直流故障穿越能力的多电平换流器,其特征是,所述错位层叠模块中半桥单元的个数 m 满足以下关系式:

$$m = \frac{U_c}{U_{mc}} - 1$$

其中: U_c 为半桥型子模块中的额定电容电压, U_{mc} 为半桥单元中的额定电容电压。

6. 如权利要求5所述的一种具有直流故障穿越能力的多电平换流器,其特征是,所述级联双子模块组中级联双子模块的个数 n_s 满足以下关系式:

$$n_s \geq \frac{\sqrt{3}U_m}{4U_{c1}}$$

其中: U_m 为换流器交流侧相电压的最大值, U_{c1} 为级联双子模块中的额定电容电压。

7. 如权利要求6所述的一种具有直流故障穿越能力的多电平换流器,其特征是,所述半桥型子模块组中半桥型子模块的个数 n_H 满足以下关系式:

$$n_H + 2n_S = \frac{U_{dc}}{U_c}$$

其中： U_{dc} 为直流输电线路的额定直流电压， U_c 为半桥型子模块中的额定电容电压， n_S 为级联双子模块组中级联双子模块的个数。

8. 如权利要求7所述的一种具有直流故障穿越能力的多电平换流器，其特征是，所述多电平换流器可输出的总电平数 N_P 满足以下关系式：

$$N_P = (n_H + 2n_S + 1) \times (m + 1)$$

n_H 为半桥型子模块组中半桥型子模块的个数， n_S 为级联双子模块组中级联双子模块的个数。

9. 如权利要求1所述的一种具有直流故障穿越能力的多电平换流器的工作方法，其特征是，包括以下步骤：

步骤(1)：换流站实时监测直流线路上的电压和电流，结合直流输电系统参数，设定相应的故障检测阈值，完成对直流线路故障时刻及故障类型的确定；

步骤(2)：直流输电系统检测到直流故障发生后，根据换流站直流侧出口处电流、电压的变化以及潮流方向确定故障地点，并对潜在故障线路上的隔离开关进行标记，以便对闭锁后的故障线路进行可靠的隔离；

步骤(3)：对混合型多电平换流器中的级联双子模块发出闭锁信号，同时闭合半桥型子模块及错位层叠模块各自并联的旁路开关，以保护半桥型子模块及错位层叠模块中的半导体器件不受过电流损害，此过程所用时间应包括故障检测装置的延时和保护装置的动作时间；

步骤(4)：闭锁完毕后断开步骤(2)中标记的隔离开关，为确保故障电流完全消除，需根据换流器的闭锁时间设定断开隔离开关的时刻；

步骤(5)：对全部换流站发出解锁信号，设定换流站运行在定直流电压控制方式下，直流母线电压上升至额定值，此时在步骤(4)中跳开的非故障线路上的隔离开关能够感应到两端预设的直流电压，当满足两端电压差小于设定值时实现“握手”后隔离开关闭合，非故障线路隔离开关闭合后再将换流站设定回各自的运行方式，从而完成故障线路隔离、非故障线路恢复运行，整个系统在预设的运行条件下达到一个新的稳定状态。

一种具有直流故障穿越能力的多电平换流器及工作方法

技术领域

[0001] 本发明涉及电力系统输电技术领域,具体涉及一种具有直流故障穿越能力的混合型多电平换流器及工作方法。

背景技术

[0002] 随着电力电子技术的飞速发展,基于全控型半导体器件的电压源换流器(Voltage Source Converter,VSC)已经越来越多地应用到高压直流输电领域。相比于传统直流输电,基于VSC的柔性直流输电(VSC-HVDC)具有传输功率灵活可控、能够补偿无功缺额、可对无源网络供电、容易构成多端网络等优点。根据换流器结构的不同,柔性直流输电可分为低电平VSC-HVDC和基于模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter,MMC)的MMC-HVDC。后者相比于前者具有开关频率低、损耗小、模块化结构易于扩展、对器件开关一致性要求不高、适用于高电压场合等优点,因而近年来得到迅速发展。

[0003] 根据构成子模块结构的不同,通常可将MMC分为:半桥型MMC(Half Bridge MMC,FBMMC)、全桥型MMC(Full Bridge MMC,FBMMC)以及双箝位型MMC(Clamp Double MMC,CDMMC)等。目前研究较多且已经投运或在建的柔性直流输电系统(如南澳三端柔性直流工程、舟山五端柔性直流工程)均采用半桥型MMC结构。然而,半桥型MMC由于自身结构的特点,在直流侧发生故障时无法通过控制换流器的闭锁来切断短路电流,只能由交流断路器开断整个直流系统,这严重增加了故障清除时间,降低了供电可靠性。

[0004] 为减少直流故障对输电系统的影响,目前可采用的方法包括:加装高压直流断路器、采用故障率较低的电缆作为传输线路、采用具有直流故障穿越能力的FBMMC或CDMMC。但存在以下缺点:高压大功率直流断路器在工程应用中还不成熟且售价过高缺乏经济性;电缆输电成本较高且容易受到铺设环境的制约;FBMMC或CDMMC自身具有清除直流故障能力,但所需半导体器件数量成倍增加,缺少经济性和实用性。

发明内容

[0005] 为解决现有技术存在的不足,本发明公开了具有直流故障穿越能力的混合型多电平换流器及工作方法,本发明能够通过闭锁换流器清除直流故障电流,且所需半导体器件数量少,正常运行时输出电压波形质量高,具有较好的经济性和实用性。

[0006] 为实现上述目的,本发明的具体方案如下:

[0007] 一种具有直流故障穿越能力的多电平换流器,包括三相桥式整流电路;所述三相桥式整流电路的每个桥臂均包括相串联的错位层叠模块、级联双子模块组、半桥型子模块组以及电抗器;所述错位层叠模块、级联双子模块组、半桥型子模块组为相互级联的结构;所述故障发生时换流器闭锁前的放电过程是一个已知初始条件的振荡放电过程,闭锁后由于桥臂等效电容值发生变化,当且仅当任何回路状态下桥臂级联电容所提供的反向电压始终大于交流线电压幅值时,利用二极管反相阻断特性使短路电流下降为零,清除直流故障。

[0008] 所述错位层叠模块由 m 个半桥单元串联构成;每个半桥单元包括2个IGBT即第一

IGBT及第二IGBT、2个反向二极管以及1个电容器；所述2个IGBT分别和相应的2个反向二极管并联组成2组可控开关；第一IGBT的发射极和第二IGBT的集电极相连；电容器的正极和第一IGBT的集电极相连，电容器的负极和第二IGBT的发射极相连。

[0009] 所述级联双子模块组由 n_s 个级联双子模块串联构成；每个级联双子模块包括5个IGBT即 $T_1 \sim T_5$ 、5个反向二极管即 $D_1 \sim D_5$ 、2个电容器即 $C_1 \sim C_2$ 以及1个箝位二极管 D_6 ；所述5个IGBT分别和相应的5个反向二极管并联组成5组可控开关；所述 T_1 的发射极和 T_2 的集电极相连， T_3 的发射极和 T_4 的集电极相连， T_2 的发射极和 T_5 的发射极相连， T_3 的集电极和 T_5 的集电极相连；所述电容器 C_1 的正极分别与 T_1 的集电极、二极管 D_6 的负极相连，电容器 C_1 的负极和 T_2 的发射极相连；所述电容器 C_2 的负极分别与 T_4 的发射极、二极管 D_6 的正极相连，电容器 C_2 的正极和 T_3 的集电极相连。

[0010] 所述半桥型子模块组由 n_H 个半桥型子模块串联构成；每个半桥型子模块包括2个IGBT即第三IGBT及第四IGBT、2个反向二极管以及1个电容器；所述2个IGBT分别和相应的2个反向二极管并联组成2组可控开关；所述第三IGBT的发射极和第四IGBT的集电极相连；所述电容器的正极和第三IGBT的集电极相连，电容器的负极和第四IGBT的发射极相连。

[0011] 所述错位层叠模块中半桥单元的个数 m 满足以下关系式：

$$[0012] \quad m = \frac{U_c}{U_{mc}} - 1$$

[0013] 其中： U_c 为半桥型子模块中的额定电容电压， U_{mc} 为半桥单元中的额定电容电压。

[0014] 所述级联双子模块组中级联双子模块的个数 n_s 满足以下关系式：

$$[0015] \quad n_s \geq \frac{\sqrt{3}U_m}{4U_{cl}}$$

[0016] 其中： U_m 为换流器交流侧相电压的最大值， U_{cl} 为级联双子模块中的额定电容电压。

[0017] 所述半桥型子模块组中半桥型子模块的个数 n_H 满足以下关系式：

$$[0018] \quad n_H + 2n_s = \frac{U_{dc}}{U_c}$$

[0019] 其中： U_{dc} 为直流输电线路的额定直流电压， U_c 为半桥型子模块中的额定电容电压。

[0020] 所述混合型多电平换流器可输出的总电平数 N_P 满足以下关系式：

$$[0021] \quad N_P = (n_H + 2n_s + 1) \times (m + 1)。$$

[0022] 具有直流故障穿越能力的混合型多电平换流器的工作方法，包括以下步骤：

[0023] 步骤(1)：换流站实时监测直流线路上的电压和电流，结合直流输电系统参数，设定相应的故障检测阈值，完成对直流线路故障时刻及故障类型的确定；

[0024] 步骤(2)：直流输电系统检测到直流故障发生后，根据换流站直流侧出口处电流、电压的变化以及潮流方向确定故障地点，并对潜在故障线路上的隔离开关进行标记，以便对闭锁后的故障线路进行可靠的隔离；

[0025] 步骤(3)：对混合型多电平换流器中的级联双子模块发出闭锁信号，同时闭合半桥型子模块及错位层叠模块各自并联的旁路开关，以保护半桥型子模块及错位层叠模块中的半导体器件不受过电流损害，此过程所用时间应包括故障检测装置的延时和保护装置的动作时间；

[0026] 步骤(4)：闭锁完毕后断开步骤(2)中标记的隔离开关，为确保故障电流完全消除，

需根据换流器的闭锁时间设定断开隔离开关的时刻；

[0027] 步骤(5)：对全部换流站发出解锁信号，设定换流站运行在定直流电压控制方式下，直流母线电压上升至额定值，此时在步骤(4)中跳开的非故障线路上的隔离开关能够感应到两端预设的直流电压，当满足两端电压差小于设定值时实现“握手”后隔离开关闭合，非故障线路隔离开关闭合后再将换流站设定回各自的运行方式，从而完成故障线路隔离、非故障线路恢复运行，整个系统在预设的运行条件下达到一个新的稳定状态。

[0028] 本发明的有益效果：

[0029] 1. 本发明的混合型多电平换流器基于错位层叠理论，采用错位层叠模块、级联双子模块、半桥型子模块相互级联的结构，具有优化输出电平、降低谐波含量、半导体器件使用数量少等优点。

[0030] 2. 本发明的混合型多电平换流器，当直流侧发生短路故障时，能够通过闭锁换流器自限制清除直流故障电流，无需额外配备高压直流断路器，适用于普通架空线路，可应用于多端直流网络构建、新能源并网、无源网络供电等领域。

[0031] 3. 本发明的混合型多电平换流器，正常运行时具有半桥型MMC经济、实用、控制策略简单、控制方法成熟等优点，同时具备自清除直流故障的能力，对于提高多端直流系统的稳定性具有一定的研究意义。

附图说明

[0032] 图1为本发明具有直流故障穿越能力的混合型多电平换流器结构示意图；

[0033] 图2为直流故障时换流器等效电路示意图；

[0034] 图3(a)为正向电流流向时半桥型子模块闭锁状态的等效电路图；

[0035] 图3(b)为负向电流流向时半桥型子模块闭锁状态的等效电路图；

[0036] 图3(c)为正向电流流向时全桥型子模块闭锁状态的等效电路图；

[0037] 图3(d)为负向电流流向时全桥型子模块闭锁状态的等效电路图；

[0038] 图3(e)为正向电流流向时箝位双子模块闭锁状态的等效电路图；

[0039] 图3(f)为负向电流流向时箝位双子模块闭锁状态的等效电路图；

[0040] 图3(g)为正向电流流向时级联双子模块闭锁状态的等效电路图；

[0041] 图3(h)为负向电流流向时级联双子模块闭锁状态的等效电路图；

[0042] 图4为添加错位层叠模块后换流器输出电压波形示意图；

[0043] 图5为典型四端柔性直流输电系统结构示意图；

[0044] 图6(a)为本发明在直流故障下有功功率波形示意图；

[0045] 图6(b)为本发明在直流故障下无功功率波形示意图；

[0046] 图6(c)为本发明在直流故障下故障点直流电压波形示意图；

[0047] 图6(d)为本发明在直流故障下故障点直流电流波形示意图；

[0048] 图6(e)为本发明在直流故障下a相上桥臂子模块电容电压波形示意图；

[0049] 图6(f)为本发明在直流故障下换流器交流侧电压波形示意图；

[0050] 图6(g)为本发明在直流故障下换流器交流侧电流波形示意图。

具体实施方式：

[0051] 下面结合附图对本发明进行详细说明：

[0052] 如图1所示，一种具有直流故障穿越能力的混合型多电平换流器，包括三相桥式整流电路；三相桥式整流电路的每个桥臂由错位层叠模块、级联双子模块组、半桥型子模块组以及电抗器串联构成。

[0053] 如图2所示，将换流器各桥臂中级联的子模块用理想电压源等效，其中： L 为桥臂电感， R 为桥臂等值电阻， L_T 为换流变压器漏感， u_{abc} 和 i_{abc} 分别为换流变压器网侧的电压和电流， L_{dc} 和 R_{dc} 分别为直流线路等效电感和电阻， R_f 为故障电阻。

[0054] 对上、下桥臂应用基尔霍夫电压定律可得：

$$[0055] \quad u_k - L_T \frac{di_k}{dt} = -L \frac{di_{kp}}{dt} - Ri_{kp} - u_{kp} + u_{dp}$$

$$[0056] \quad u_k - L_T \frac{di_k}{dt} = L \frac{di_{kn}}{dt} + Ri_{kn} + u_{kn} + u_{dn}$$

[0057] 对上、下桥臂应用基尔霍夫电流定律可得：

$$[0058] \quad i_k = i_{kn} - i_{kp}$$

$$[0059] \quad i_{dc} = \sum_k i_{kp} = \sum_k i_{kn}$$

[0060] 直流侧电压、电流分别满足：

$$[0061] \quad u_{dc} = u_{dp} - u_{dn} = -L_{dc} \frac{di_{dc}}{dt} - (R_{dc} + R_f) i_{dc}$$

$$[0062] \quad i_{dc} = C_{eq} \frac{d \sum_k u_{kp}}{dt} = C_{eq} \frac{d \sum_k u_{kn}}{dt}$$

[0063] 其中： C_{eq} 为故障时刻桥臂等效电容值。

[0064] 将以上各式联立可得：

$$[0065] \quad \frac{d^2 i_{dc}}{dt^2} + \frac{R_e}{L_e} \frac{di_{dc}}{dt} + \frac{1}{L_e C_e} i_{dc} = 0$$

[0066] 其中： $L_e = 2L/3 + L_{dc}$ ； $R_e = 2R/3 + R_{dc} + R_f$ ； $C_e = 3C_{eq}$ 。

[0067] 以故障发生时刻为 $t=0$ ， U_{dc} 、 I_{dc} 为初值，求解方程可得直流电流 i_{dc} 的解析表达式为：

$$[0068] \quad i_{dc} = e^{-\frac{t}{\tau}} \left[-\frac{I_{dc} \omega_0}{\omega} \sin(\omega t - \alpha) - \frac{U_{dc}}{\omega L_e} \sin(\omega t) \right]$$

[0069] 其中： $\tau = 2L_e / R_e$ ； $\omega = \sqrt{1/(L_e C_e) - [R_e / (2L_e)]^2}$ ； $\omega_0 = \sqrt{1/(L_e C_e)}$ ； $\alpha = \arctan(\omega \tau)$ 。

[0070] 故障发生时换流器闭锁前的放电过程是一个已知初始条件的振荡放电过程，闭锁后由于桥臂等效电容值发生变化，当且仅当任何回路状态下桥臂级联电容所提供的反向电压始终大于交流线电压幅值时，利用二极管反相阻断特性可使短路电流下降为零，从而清除直流故障。

[0071] 如图3(a)、(b)所示，正向电流流向时半桥型子模块闭锁状态等效电压为 U_c ，负向电流流向时等效电压为0，反向二极管可为故障电流提供通路，因此无法清除直流故障；如

图3(c)、(d)所示,正向电流流向时全桥型子模块闭锁状态等效电压为 U_c ,负向电流流向时等效电压亦为 U_c ,利用二极管反相阻断特性可使短路电流下降为零,从而清除直流故障;如图3(e)、(f)所示,正向电流流向时箝位双子模块闭锁状态等效电压为 $2U_c$,负向电流流向时等效电压为 U_c ,由于等效电路存在两种不同状态,系统对子模块电容反复充电,导致直流故障清除时间延长;如图3(g)、(h)所示,正向电流流向时级联双子模块闭锁状态等效电压为 $2U_c$,负向电流流向时等效电压亦为 $2U_c$,故障期间对外等效电路状态不变,且产生单位等效电压所需半导体数量较少,故障清除效果和经济性俱佳。

[0072] 错位层叠模块由 m 个半桥单元串联构成,采用上下桥臂对称的结构,能够在原输出电压波形的基础上产生一些小幅度的错位,再将不同幅度的错位波形进行叠加,便可得到一个电平数更高、谐波含量更少的电压波形。如图4所示,当错位层叠模块中半桥单元数 m 为2时,可将一个电平数为2的电压波形改善成电平数为7的电压波形,从而获得较高的拟合度。

[0073] 当直流侧发生永久性双极短路故障时,系统实现故障线路切除、非故障线路恢复过程的具体步骤如下:

[0074] 步骤(1):换流站实时监测直流线路上的电压和电流,结合直流输电系统参数,设定相应的故障检测阈值,完成对直流线路故障时刻及故障类型的确定;

[0075] 步骤(2):直流输电系统检测到直流故障发生后,根据换流站直流侧出口处电流、电压的变化以及潮流方向确定故障地点,并对潜在故障线路上的隔离开关进行标记,以便对闭锁后的故障线路进行可靠的隔离;

[0076] 步骤(3):对混合型多电平换流器中的级联双子模块发出闭锁信号,同时闭合半桥型子模块及错位层叠模块各自并联的旁路开关,以保护半桥型子模块及错位层叠模块中的半导体器件不受过电流损害,此过程所用时间应包括故障检测装置的延时和保护装置的动作时间;

[0077] 步骤(4):闭锁完毕后断开步骤(2)中标记的隔离开关,为确保故障电流完全消除,需根据换流器的闭锁时间设定断开隔离开关的时刻;

[0078] 步骤(5):对全部换流站发出解锁信号,设定换流站运行在定直流电压控制方式下,直流母线电压上升至额定值,此时在步骤(4)中跳开的非故障线路上的隔离开关能够感应到两端预设的直流电压,当满足两端电压差小于设定值时实现“握手”后隔离开关闭合,非故障线路隔离开关闭合后再将换流站设定回各自的运行方式,从而完成故障线路隔离、非故障线路恢复运行,整个系统在预设的运行条件下达到一个新的稳定状态。

[0079] 为了进一步验证本实施方式的有效性和可行性,在电力系统暂态仿真软件PSCAD/EMTDC中搭建如图5所示的典型四端柔性直流输电系统,具体参数为:交流系统电压等级220kV;直流系统电压等级 ± 200 kV;换流变压器采用 Y_0/Δ 型接线方式,漏抗0.1pu;换流站每个桥臂由12个HBSM、4个SDSM和1个MCSM级联而成,容量为400MVA;子模块电容3400 μ F;每桥臂串联电抗器32mH;MMC1采用定直流电压和定交流电压的控制方式,MMC2采用直流电压下降和定交流电压的控制方式,MMC3和MMC4均采用定有功功率和定无功功率的控制方式;换流站之间通过直流电缆连接,设定电缆的单位距离阻抗为0.01 Ω /km,各段长度 l_{12} 、 l_{23} 、 l_{34} 、 l_{14} 分别为100km、120km、200km、180km。

[0080] 假设系统稳态运行至2s时,在直流线路 l_{12} 靠近换流站1的端口处发生直流侧双极

短路故障。图6 (a) 为直流故障下有功功率波形示意图;图6 (b) 为直流故障下无功功率波形示意图;图6 (c) 为直流故障下故障点直流电压波形示意图;图6 (d) 为直流故障下故障点直流电流波形示意图;图6 (e) 为直流故障下a相上桥臂子模块电容电压波形示意图;图6 (f) 为直流故障下换流器交流侧电压波形示意图;图6 (g) 为直流故障下换流器交流侧电流波形示意图。

[0081] 从上述图来看,本实施方式具有在发生直流故障时快速闭锁换流器,并在短时间内恢复非故障线路正常运行的能力;故障闭锁期间子模块电容电压维持在额定值附近并保持不变,故障线路切除后子模块可以直接投入使用无需再次充电,缩短了系统恢复供电所需时间;闭锁期间没有出现交流电流越限的情况,交流电压变化维持在 $\pm 5\%$ 以内,对交流系统的影响较小。

[0082] 上述虽然结合附图对本发明的具体实施方式进行了描述,但并非对本发明保护范围的限制,所属领域技术人员应该明白,在本发明的技术方案的基础上,本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本发明的保护范围以内。

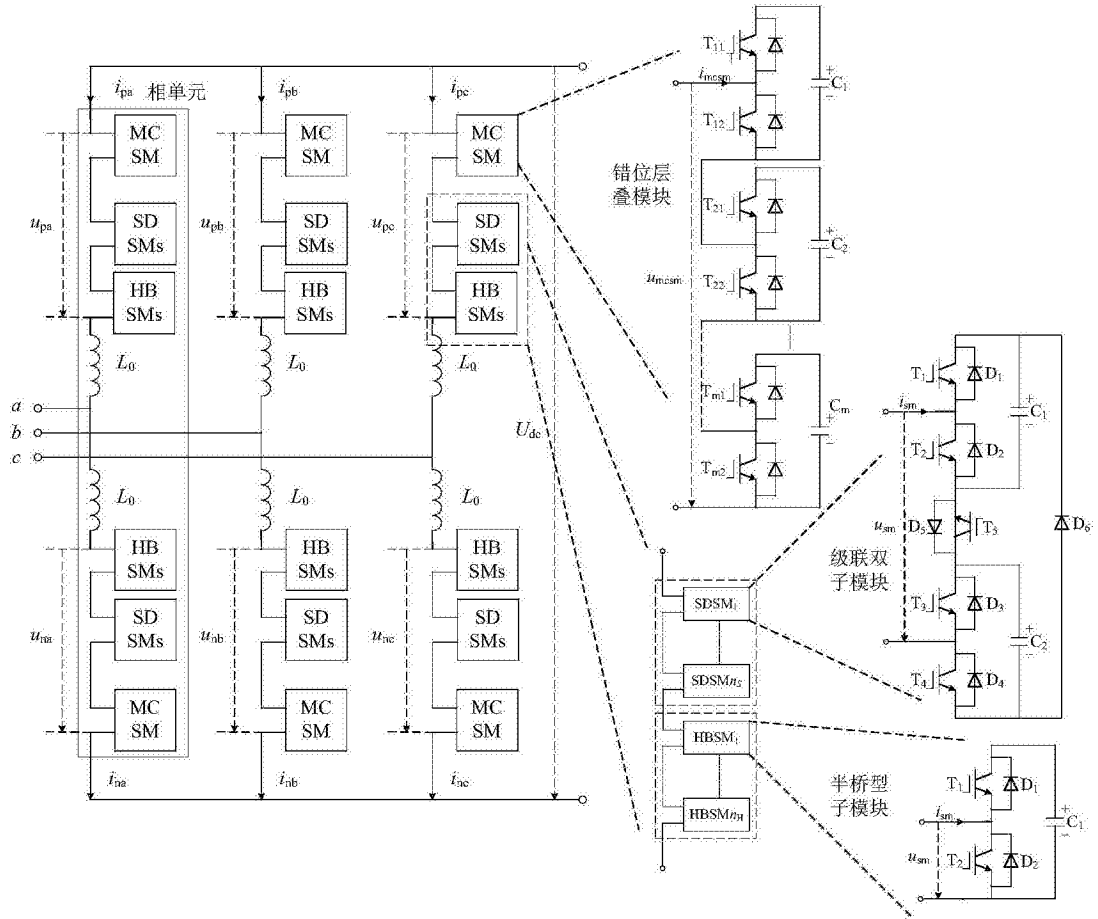


图1

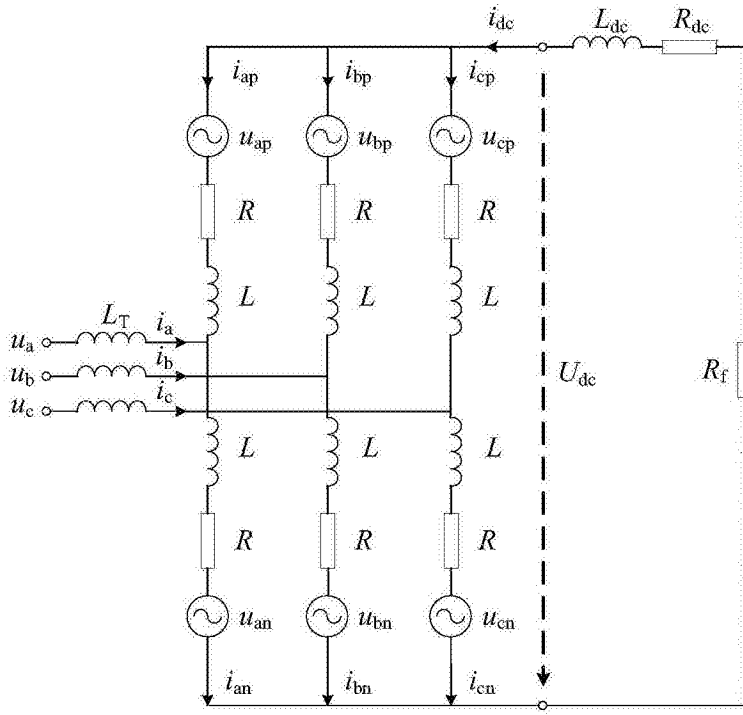


图2

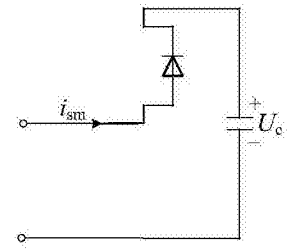


图3 (a)

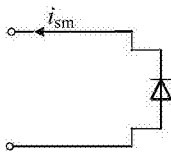


图3 (b)

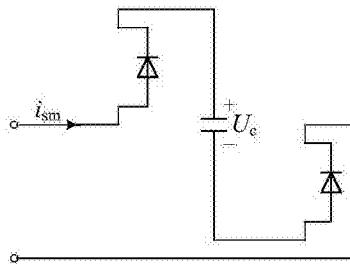


图3 (c)

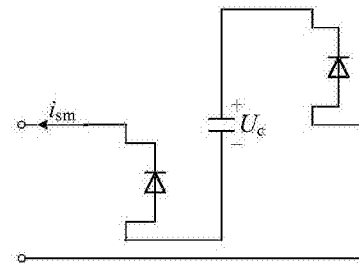


图3 (d)

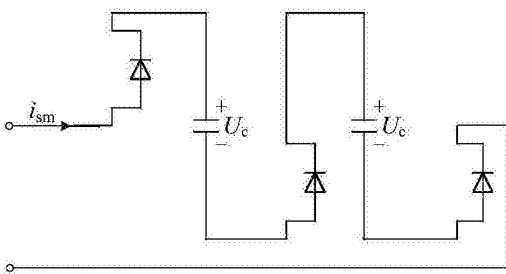


图3 (e)

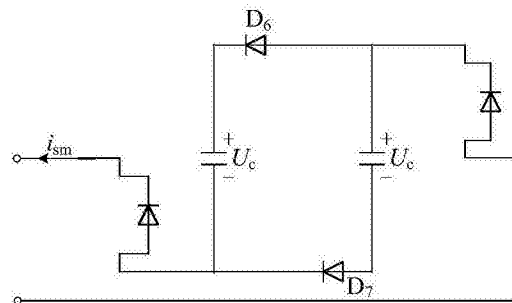


图3 (f)

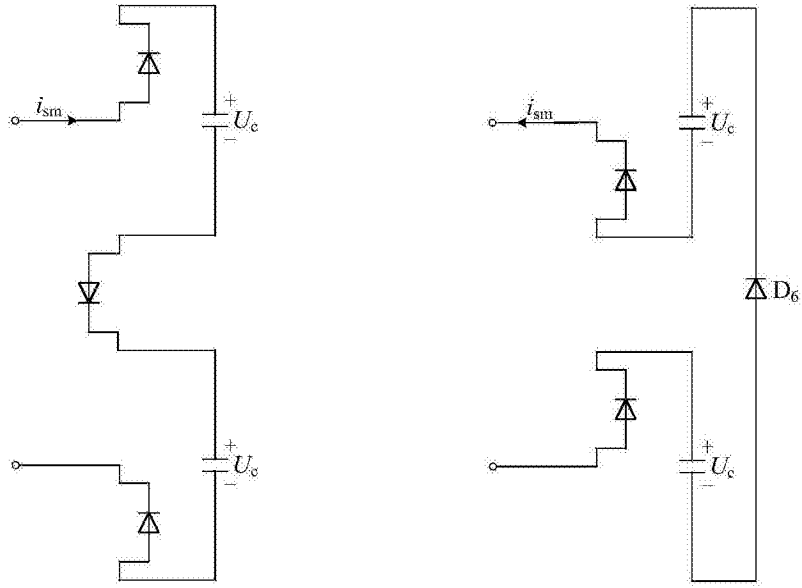


图3 (g)

图3 (h)

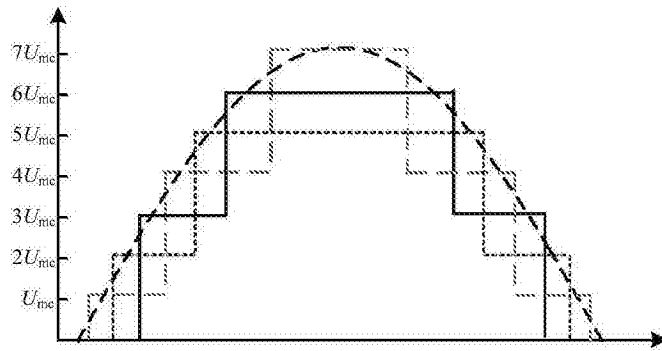


图4

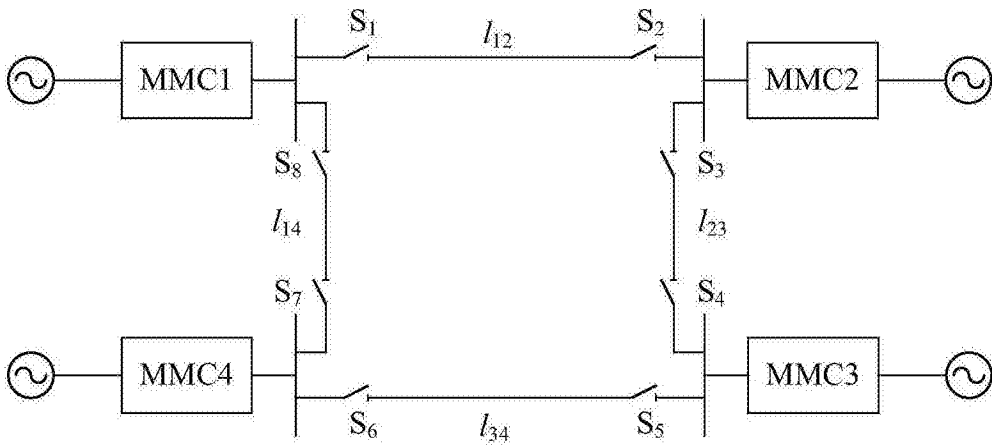


图5

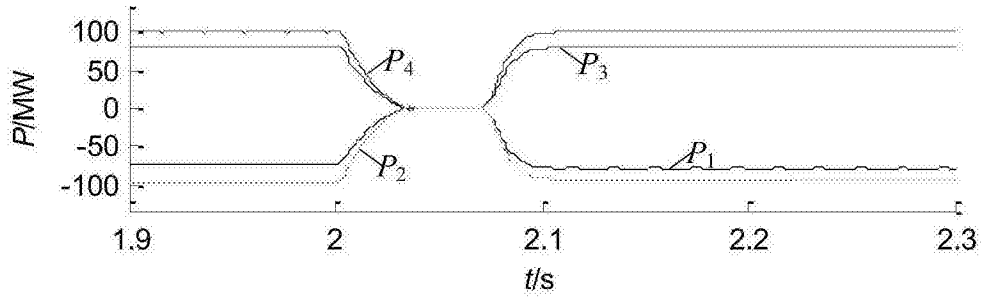


图6 (a)

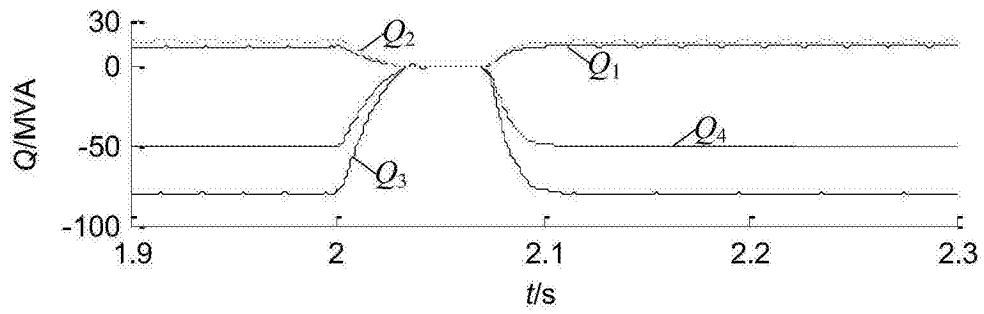


图6 (b)

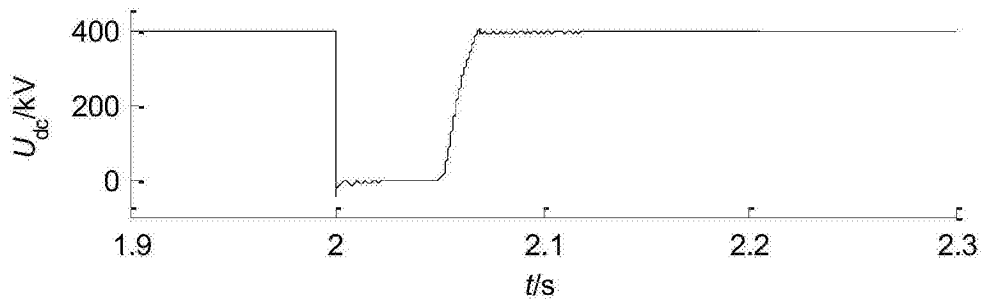


图6 (c)

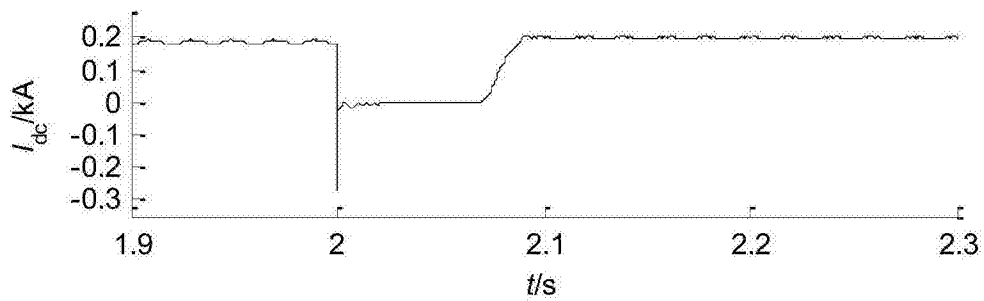


图6 (d)

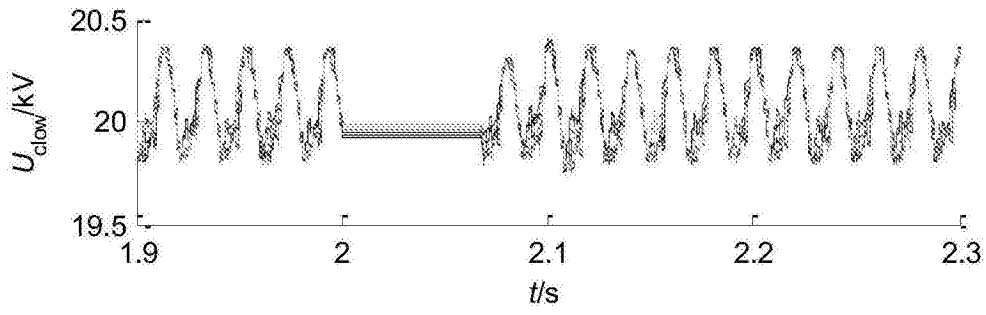


图6 (e)

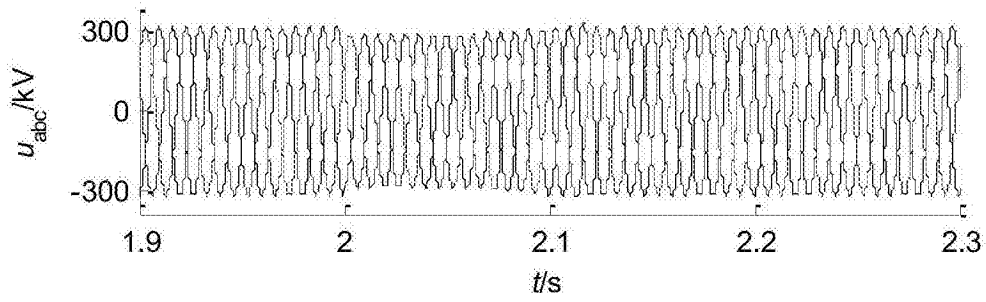


图6 (f)

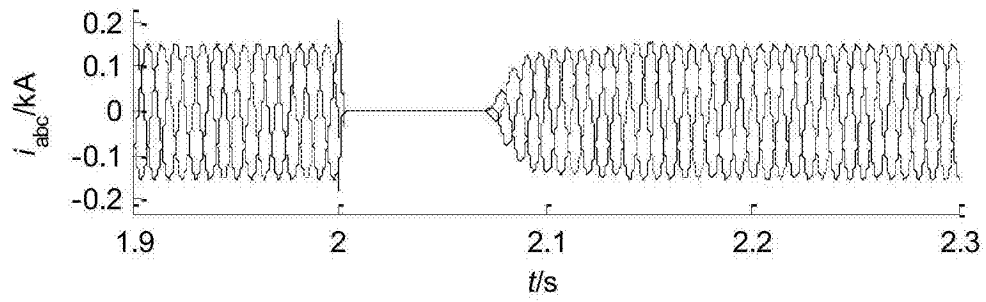


图6 (g)