



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105634259 A

(43) 申请公布日 2016. 06. 01

(21) 申请号 201510272888. 9

(22) 申请日 2015. 05. 26

(71) 申请人 华北电力大学

地址 102206 北京市昌平区回龙观镇北农路  
2号

(72) 发明人 许建中 赵成勇 赵鹏豪 袁艺嘉

(51) Int. Cl.

H02M 1/32(2007. 01)

权利要求书1页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

一种混合模块化多电平换流器的可靠性分析和冗余配置计算方法

(57) 摘要

本发明涉及一种混合模块化多电平换流器可靠性分析和冗余配置方法。本发明的有益效果在于,以保证混合模块化多电平换流器可靠切断直流故障电流为前提,分析了混合模块化多电平换流器中不同类型子模块数目的初始临界比例,进而提出了混合模块化多电平换流器的最优冗余子模块配置方法,该方法同时考虑了换流器的可靠性和冗余子模块中绝缘栅双极晶体管的有效利用率,兼顾了可靠性和经济性。本发明所提出的方法可以为工程设计提供参考。

1. 一种混合模块化多电平换流器的可靠性分析和冗余配置计算方法,其特征是在保证混合模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的直流故障穿越能力的前提下,通过计算混合模块化多电平换流器的可靠性和冗余子模块中绝缘栅双极晶体管的有效利用率选择混合 MMC 的最优配置方案,包括以下步骤:步骤 1:以混合 MMC 可靠穿越直流双极短路故障为前提,在不考虑冗余的情况下,计算稳态运行情况下每个桥臂中单箝位子模块(Clamp Single Sub-module, CSSM)数目的最小比例,步骤 2:建立混合 MMC 的冗余数目与可靠性的关系模型,计算基于半桥子模块(Half Bridge Sub-module, HBSM)和 CSSM 的混合 MMC 的可靠性  $R_{MMC}$ ;步骤 3:定义  $N_{OH}$ 和  $N_{OCS}$ 分别为每个桥臂中 HBSM 和 CSSM 的冗余子模块数目,利用一阶向后差分分别计算  $R_{MMC}$ 对  $N_{OH}$ 和  $N_{OCS}$ 的变化率;步骤 4:筛选临界值,当  $N_{OH}$ 和  $N_{OCS}$ 的值大于临界值时,  $R_{MMC}$ 的增长很小(小于设定的阈值);步骤 5:计算临界值处冗余子模块中绝缘栅双极晶体管的有效利用率;步骤 6:兼顾冗余模块数目对混合 MMC 的可靠性影响和经济性的影响,建立考虑权重的目标函数,利用步骤 3 中临界值处的  $R_{MMC}$ 和步骤 4 中计算结果选择混合 MMC 中子模块的最优冗余配置。

2. 基于权利要求 1 中所述的一种混合模块化多电平换流器的可靠性分析和冗余配置计算方法,其特征是步骤 1, 2, 3, 4, 5 和 6 整体作为发明内容, 6 个步骤为有机的不可分割的整体。

## 一种混合模块化多电平换流器的可靠性分析和冗余配置计算方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于输配电技术领域,尤其涉及一种混合模块化多电平换流器的可靠性分析和冗余配置计算方法。

### 背景技术

[0002] 模块化多电平换流器型高压直流输电系统(Modular multilevel converter based high voltage direct current, MMC-HVDC)正在得到日益广泛的关注。与传统两电平和三电平电压源换流器(Voltage-sourced Converter, VSC)相比,MMC 具有无需大量 IGBT 串联、器件承受电压变化率低、输出波形谐波含量较低等优点。可以预见的是,MMC-HVDC 将在未来得到更为广泛的应用。

目前,直流短路故障是 MMC-HVDC 的一个重要问题。实际工程多采用半桥子模块(Half-bridge Sub-module, HBSM),但其不具备直流故障穿越能力,极大地限制了其在架空线领域的应用。直流断路器(DC Circuit Breaker, DCCB)虽然可以迅速隔离直流短路故障,但由于技术不成熟,直流断路器在高压大容量场合仍鲜有应用。在这样的技术背景下,一种比较实际和可行的方案是采用具有可箝位直流故障电流的子模块拓扑以组成具备直流故障穿越能力的 MMC,主要全桥子模块(Full-bridge Sub-module, FBSM),双箝位子模块(Clamp-double Sub-module, CDSM),单箝位子模块(Clamp-single Sub-module, CSSM)。但与 HBSM 相比,具有直流故障电流箝位能力的子模块拓扑需要更多的电力电子器件,造价较高。一种较为可行的技术方案是采用由两种类型的子模块拓扑组成的混合 MMC,其中一种为 HBSM,另一种子模块拓扑具备直流故障电流箝位能力。稳态情况下两种子模块拓扑共同支撑直流电流,直流短路故障情况下闭锁换流器,由具备直流故障电流箝位能力的子模块拓扑切断直流故障。

实际工程中,MMC 的每个桥臂都有上百个子模块,子模块故障在工程上有可能随时会发生,因此,常配置一定数目的冗余子模块。冗余子模块的数目对 MMC 的可靠性和工程造价有重要影响。由于混合 MMC 一般由两种类型的子模块拓扑构成,两种类型子模块的冗余配置相互影响,因而混合 MMC 的冗余配置是一个非常复杂的决策过程,且对工程的可靠性和经济性有重要影响。

### 发明内容

[0003] 本发明所要解决的技术问题是混合 MMC 的可靠性分析和子模块冗余配置方法。为了便于说明该方法,本发明以由 HBSM 和 CSSM 组成的混合 MMC 为例进行说明,其中 CSSM 具有直流故障电流箝位能力。

所述方法具体包括以下步骤:

步骤 1:以混合 MMC 可靠穿越直流双极短路故障为前提,在不考虑冗余的情况下,计算稳态运行情况下每个桥臂中 CSSM 数目的最小比例。

步骤 2:建立混合 MMC 的冗余数目与可靠性的关系模型,计算基于 HBSM 和 CSSM 的混合 MMC 的可靠性  $R_{MMC}$ ;

步骤 3:定义  $N_{OH}$  和  $N_{OCS}$  分别为每个桥臂中 HBSM 和 CSSM 的冗余子模块数目,利用一阶向后差分分别计算  $R_{MMC}$  对  $N_{OH}$  和  $N_{OCS}$  的变化率;

步骤 4:筛选临界值,当  $N_{OH}$  和  $N_{OCS}$  的值大于临界值时,  $R_{MMC}$  的增长很小(小于设定的阈值);

步骤 5:计算临界值处冗余子模块中绝缘栅双极晶体管的有效利用率;

步骤 6:兼顾冗余模块数目对混合 MMC 的可靠性影响和经济性的影响,建立考虑权重的目标函数,利用步骤 3 中临界值处的  $R_{MMC}$  和步骤 4 中计算结果选择混合 MMC 中子模块的最优冗余配置。

通过以上 6 个步骤,本发明能够在保证混合 MMC 可靠切断直流故障电流的前提下,以混合 MMC 的可靠性分析为基础,计算混合 MMC 的最优冗余配置,为工程设计提供参考。

### 附图说明

[0004] 图 1 为 MMC 的基本拓扑结构,其中 SM 表示子模块(Sub-module, SM),  $L$  为桥臂电抗器,  $U_{dc}$  为直流侧电压。图 2 为 HBSM 的拓扑结构,其中 T1、T2 表示绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT), D1、D2 表示二极管, C 表示电容,  $U_c$  为电容电压,虚线为换流器闭锁时在不同电流方向下子模块中的电流路径。图 3 为 CSSM 的拓扑结构,其中 T1、T2 和 T3 表示 IGBT, D1、D2、D3 和 D4 表示二极管,虚线为换流器闭锁时在不同电流方向下子模块中的电流路径。图 4 为闭锁时混合 MMC 中的电流通路,其中虚线为电流路径,以 A 相上桥臂和 C 相下桥臂为例。

### 具体实施方式

[0005] 下面将对本发明涉及的混合 MMC 的可靠性分析和冗余计算方法进行详细说明。应该强调的是,下述说明仅仅是示例性的,而不是为了限制本发明的范围及其应用。

本发明所要解决的技术问题是在保证混合 MMC 的直流故障穿越能力的前提下,通过计算混合 MMC 的可靠性和冗余子模块中 IGBT 的有效利用率选择混合 MMC 的最优配置方案。本发明采用如下技术方案实现:

本发明通过如下六个步骤来实现:

步骤 1:以混合 MMC 可靠穿越直流双极短路故障为前提,在不考虑冗余的情况下,计算稳态运行情况下每个桥臂中 CSSM 数目的最小比例。

不计冗余时,假设混合 MMC 每个桥臂中所需的 HBSM 和 CSSM 模块的数目分别为  $N_H$  和  $N_{CS}$ ,子模块电容电压为  $U_c$ ,则混合 MMC 直流电压  $U_{dc}$  和交流电压之间关系如公式 (1) 所示。

$$\begin{cases} U_{dc} = (N_H + N_{CS})U_C \\ U_{ph} = \frac{1}{2}mU_{dc} = \frac{1}{2}m(N_H + N_{CS})U_C \\ U_L = \sqrt{3}U_{ph} = \frac{\sqrt{3}}{2}m(N_H + N_{CS})U_C \end{cases} \quad (1)$$

公式(1)中,  $m$ 为调制比 ( $m < 1$ ),  $U_{ph}$ 和  $U_L$ 分别为换流变压器副边交流相电压和线电压的幅值。如图 4 所示, 故障电流在不同相的上下桥臂之间流动, 以 A 相上桥臂和 C 相下桥臂为例进行说明。故障电流通路中共有  $2N_{CS}$ 个电容串联, 为了保证混合 MMC 的直流故障穿越能力, 每个桥臂中的 CSSM 数目应满足公式(2)的要求。

$$2N_{CS}U_C \geq U_L \quad (2)$$

结合公式(1)和公式(2), 可以得到每个桥臂中 CSSM 的数目比例, 如公式(3)所示:

$$\left[ \frac{\sqrt{3}}{4}m \right] \leq \frac{N_{CS}}{N_H + N_{CS}} \leq 1 \quad (3)$$

步骤 2: 建立混合 MMC 的冗余数目与可靠性的关系模型, 计算基于 HBSM 和 CSSM 的混合 MMC 的可靠性  $R_{MMC}$ 。

由于 MMC 的 6 个桥臂在电气上完全对称, 因此, 一个桥臂的可靠性可以在一定程度上代表 MMC 的可靠性, 本发明以一个桥臂的可靠性表示 MMC 的可靠性。如果每个桥臂中发生故障的 HBSM 和 CSSM 的数目分别为  $i_H$ 和  $i_{CS}$ , 由于桥臂中 CSSM 的数目影响 MMC 的直流故障穿越能力。为了保证 MMC 的可靠性, 规定冗余的 CSSM 可以用于替代发生故障的 HBSM 和 CSSM, 而冗余的 HBSM 仅可以替代发生故障的 HBSM, 而不能替代发生故障的 CSSM, 否则桥臂中可正常运行的 CSSM 数目减少, 可能使混合 MMC 失去直流故障穿越能力。因此, 根据发生故障的子模块数目的不同, 可靠性计算应包括两部分:

1)  $i_H \leq N_{OH}, i_{CS} \leq N_{OCS}$ , 此时 MMC 可靠性为  $R_1$ , 如公式(4)所示:

$$R_1 = \sum_{i_H=0}^{N_{OH}} \left[ \sum_{i_{CS}=0}^{N_{OCS}} C_{N_H-N_{OH}+i_H}^{i_H} (1-R_H)^{i_H} R_H^{N_H-N_{OH}+i_H} C_{N_{CS}-N_{OCS}+i_{CS}}^{i_{CS}} (1-R_{CS})^{i_{CS}} R_{CS}^{N_{CS}-N_{OCS}+i_{CS}} \right] \quad (4)$$

2)  $i_H > N_{OH}, i_{CS} \leq N_{OH}+N_{OCS}-i_H$ , 此时 MMC 可靠性为  $R_2$ , 如公式(5)所示:

$$R_2 = \sum_{i_H=N_{OH}+1}^{N_{OH}+N_{OCS}} \left[ \sum_{i_{CS}=0}^{N_{OH}+N_{OCS}-i_H} C_{N_H-N_{OH}+i_H}^{i_H} (1-R_H)^{i_H} R_H^{N_H-N_{OH}+i_H} C_{N_{CS}-N_{OCS}+i_{CS}}^{i_{CS}} (1-R_{CS})^{i_{CS}} R_{CS}^{N_{CS}-N_{OCS}+i_{CS}} \right] \quad (5)$$

公式(4)和公式(5)中  $C$ 为组合数。综合考虑上述两种情况后的混合 MMC 的可靠性  $R_{MMC}$  可由公式(6)表示为:

$$R_{\text{MMC}} = R_1 + R_2 \quad (6)$$

为了便于计算,将  $R_{\text{MMC}}$  的值放入矩阵  $R$  中,如式 (7) 所示:

$$R(i, j) = R_{\text{MMC}} \quad (i=1, 2, \dots, N_{\text{OCSm}} + 1, j=1, 2, \dots, N_{\text{OHm}} + 1) \quad (7)$$

其中,  $N_H$  和  $N_{CS}$  分别为稳态运行情况下每个桥臂中 HBSM 和 CSSM 的数目,  $N_{\text{OH}}$  和  $N_{\text{OCS}}$  分别为每个桥臂中 HBSM 和 CSSM 的冗余数目,  $N_{\text{OHm}}$  和  $N_{\text{OCSm}}$  分别是  $N_{\text{OH}}$  和  $N_{\text{OCS}}$  的最大值,即  $N_{\text{OH}}$  从 1 到  $N_{\text{OHm}}$  变化,  $N_{\text{OCS}}$  从 1 到  $N_{\text{OCSm}}$  变化,对应每一组  $N_{\text{OH}}$  和  $N_{\text{OCS}}$  的值,都可以计算出相应的  $R_{\text{MMC}}$ ,亦即计算在不同的冗余配置下换流器的可靠性。需要说明的是  $i_H$ 、 $i_{CS}$ 、 $N_{\text{OH}}$ 、 $N_{\text{OCS}}$ 、 $N_{\text{OHm}}$  和  $N_{\text{OCSm}}$  均为整数。

步骤 3: 定义  $N_{\text{OH}}$  和  $N_{\text{OCS}}$  分别为每个桥臂中 HBSM 和 CSSM 的冗余子模块数目,利用一阶向后差分分别计算  $R_{\text{MMC}}$  对  $N_{\text{OH}}$  和  $N_{\text{OCS}}$  的变化率。

因为  $N_{\text{OH}}$  和  $N_{\text{OCS}}$  均为正数,因此由步骤 1 得到的  $R_{\text{MMC}}$  是关于  $N_{\text{OH}}$  和  $N_{\text{OCS}}$  的二元离散函数。对于离散数据,可用差分近似表示  $R_{\text{MMC}}$  随着  $N_{\text{OH}}$  和  $N_{\text{OCS}}$  的变化规律。

为了便于计算,将  $R_{\text{MMC}}$  对  $N_{\text{OH}}$  和  $N_{\text{OCS}}$  的一阶向后差分分别放入矩阵  $D_H$  和  $D_{CS}$  中,矩阵  $D_H$  和  $D_{CS}$  中元素的计算方法分别如公式 (8) 和 (9) 所示。

$$D_H(i, j) = R(i, j+1) - R(i, j) \quad (i=1, 2, \dots, N_{\text{OCSm}} + 1, j=1, 2, \dots, N_{\text{OHm}}) \quad (8)$$

$$D_{CS}(i, j) = R(i+1, j) - R(i, j) \quad (i=1, 2, \dots, N_{\text{OCSm}}, j=1, 2, \dots, N_{\text{OHm}} + 1) \quad (9)$$

步骤 4: 筛选临界值,当  $N_{\text{OH}}$  和  $N_{\text{OCS}}$  的值大于临界值时,  $R_{\text{MMC}}$  的增长很小(小于设定的阈值);

设定阈值  $t$ ,则选择临界点的方法如公式 (10) 和公式 (11) 所示。

$$D_H(i, j) \geq t \& D_H(i, j+1) < t \quad (i=1, 2, \dots, N_{\text{OCSm}}, j=1, 2, \dots, N_{\text{OHm}} - 1) \quad (10)$$

$$D_{CS}(i, j) \geq t \& D_{CS}(i+1, j) < t \quad (i=1, 2, \dots, N_{\text{OCSm}} - 1, j=1, 2, \dots, N_{\text{OHm}}) \quad (11)$$

满足公式 (10) 和公式 (11) 的  $N_{\text{OH}}$  和  $N_{\text{OCS}}$  的值即为临界值。

步骤 5: 计算临界值处冗余子模块中绝缘栅双极晶体管的有效利用率。

首先计算冗余子模块中 IGBT 的有效数目,与可靠性计算类似,冗余子模块中 IGBT 有效数目的计算也分为两部分,分别如公式 (12) 和公式 (13) 所示:

$$Q_1 = \sum_{i_H=1}^{N_{\text{OH}}} \left[ \sum_{i_{CS}=1}^{N_{\text{OCS}}} (2i_H + 3i_{CS}) C_{N_H - N_{\text{OH}}}^{i_H} (1 - R_H)^{i_H} R_H^{N_H - N_{\text{OH}} - i_H} C_{N_{CS} - N_{\text{OCS}}}^{i_{CS}} (1 - R_{CS})^{i_{CS}} R_{CS}^{N_{CS} - N_{\text{OCS}} - i_{CS}} \right] \quad (12)$$

$$Q_2 = \sum_{i_H=1}^{N_{\text{OH}}} \left[ \sum_{i_{CS}=1}^{N_{\text{OCS}}} (2i_H + 3i_{CS}) C_{N_H - N_{\text{OH}}}^{i_H} (1 - R_H)^{i_H} R_H^{N_H - N_{\text{OH}} - i_H} C_{N_{CS} - N_{\text{OCS}}}^{i_{CS}} (1 - R_{CS})^{i_{CS}} R_{CS}^{N_{CS} - N_{\text{OCS}} - i_{CS}} \right] \quad (13)$$

则冗余子模块中 IGBT 的有效数目  $Q$  可由公式 (14) 表示:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (14)$$

冗余子模块中 IGBT 的有效利用率  $\eta$  的定义如公式 (15) 所示：

$$\eta = \frac{Q}{2N_{\text{OH}} + 3N_{\text{OCS}}} \quad (15)$$

步骤 6：兼顾冗余模块数目对混合 MMC 的可靠性影响和经济性的影响，建立考虑权重的目标函数，利用步骤 3 中临界值处的  $R_{\text{MMC}}$  和步骤 4 中计算结果选择混合 MMC 中子模块的最优冗余配置。

为了综合考虑冗余模块数目对混合 MMC 可靠性的影响以及冗余模块中 IGBT 的有效利用率，提出了如公式 (16) 所示的目标函数：

$$F = \omega_1 R_{\text{MMC}} + \omega_2 \eta \quad (16)$$

其中  $\omega_1$  和  $\omega_2$  为权重系数。目标函数的计算使用由公式 (10) 和 (11) 得到的  $N_{\text{OH}}$  和  $N_{\text{OCS}}$  的临界值。与目标函数  $F$  的最大值相对应的  $N_{\text{OH}}$  和  $N_{\text{OCS}}$  即为混合 MMC 的最优冗余配置。

本发明的有益效果在于，以保证混合 MMC 可靠切断直流故障电流为前提，分析了混合 MMC 中不同类型子模块数目的初始临界比例，进而提出了混合 MMC 的最优冗余子模块配置方法，该方法同时考虑了换流器的可靠性和冗余子模块中 IGBT 的有效利用率。

本发明所提出的可靠性分析和最优冗余配置方法可以推广应用于任何由不同类型以及包含两种以上类型子模块拓扑的混合 MMC 中，具有工程实用价值。

以上所述，仅为本发明较佳的具体实施方式，但本发明的保护范围并不局限于此，任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内，可轻易想到的变化或替换，都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此，本发明的保护范围应该以权利要求的保护范围为准。

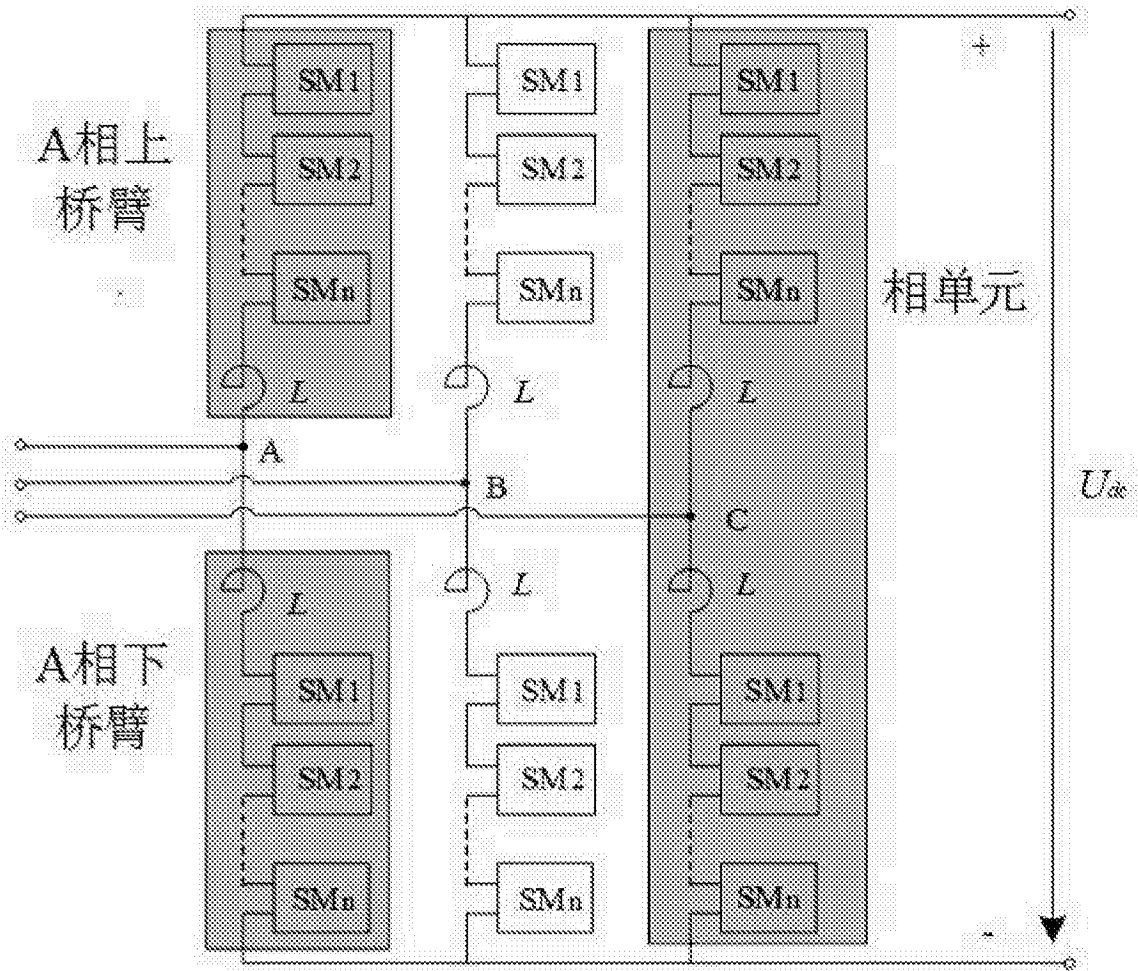


图 1



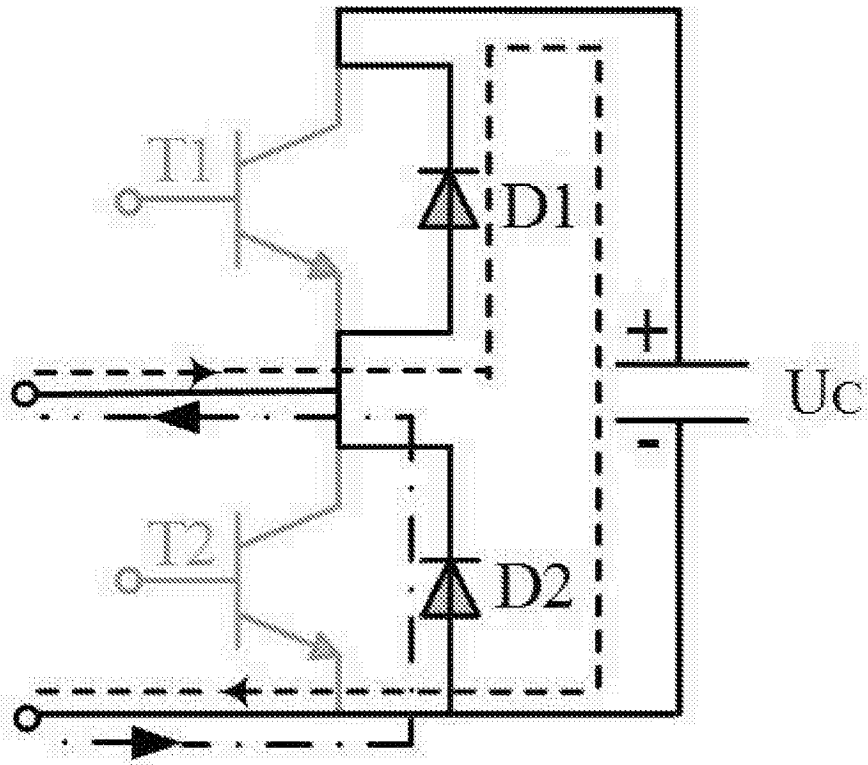


图 2

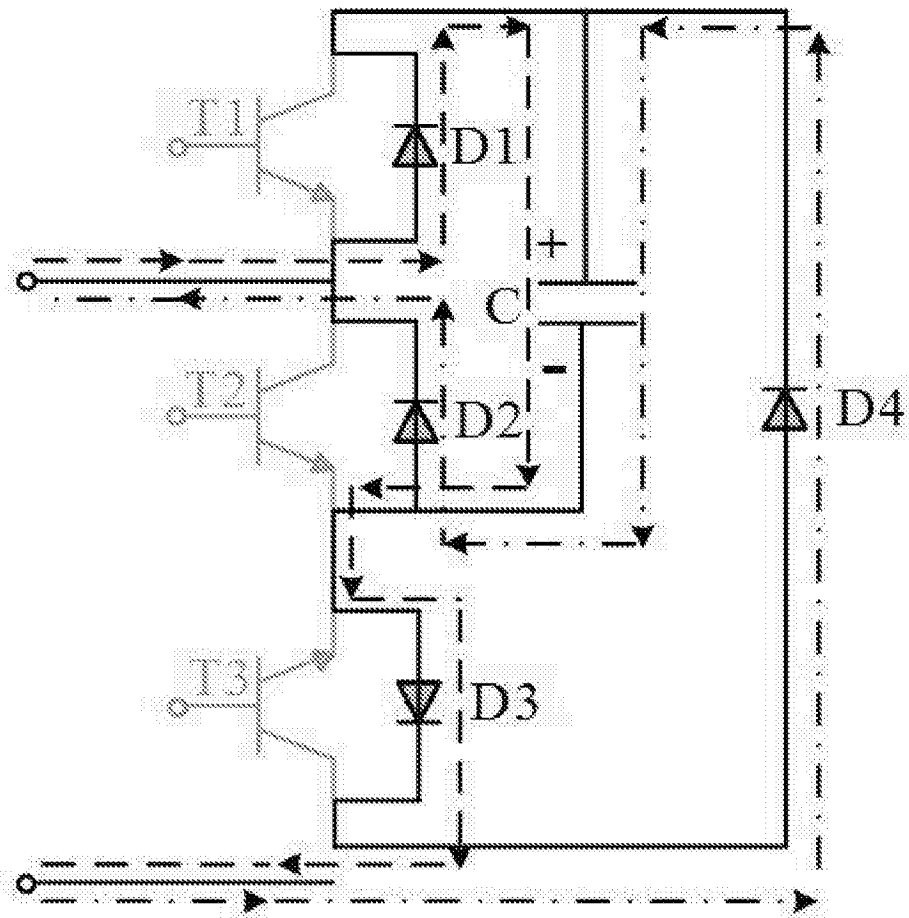


图 3

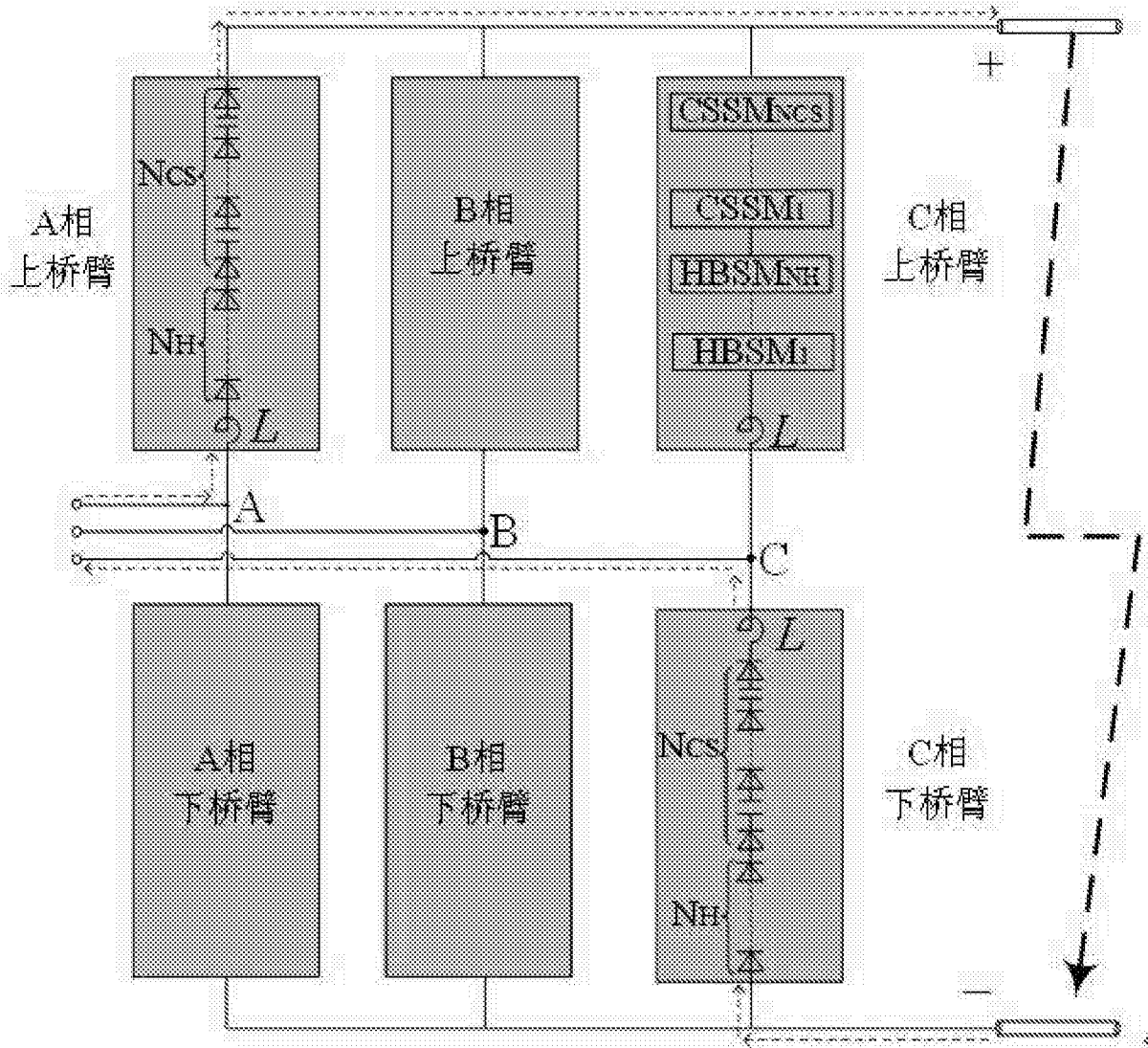


图 4