



# (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104866656 B

(45)授权公告日 2017.10.20

(21)申请号 201510237501.6

(22)申请日 2015.05.12

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 104866656 A

(43)申请公布日 2015.08.26

(73)专利权人 中国科学院电工研究所  
地址 100190 北京市海淀区中关村北二条6号

(72)发明人 徐飞 李耀华 王平 李子欣  
高范强

(74)专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责  
任公司 11251

代理人 关玲

(51)Int. Cl.

G06F 17/50(2006.01)

(56)对比文件

CN 103746583 A, 2014.04.23,

CN 104036066 A, 2014.09.10,

雷鸣等. 一种新型单桥臂电感模块化多电平变流器及其控制方法.《电工技术学报》.2014,第29卷(第2期),第231-238页.

审查员 焦月

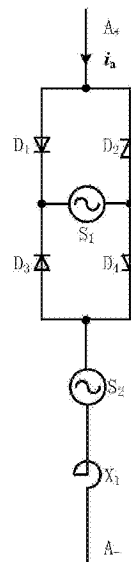
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

一种全桥结构模块化多电平换流器桥臂等效电路

(57)摘要

本发明公开了一种全桥结构模块化多电平换流器桥臂等效电路,所述桥臂等效电路将桥臂中的全桥功率模块分类为受控模块和不控模块两类,桥臂中所有受控模块等效为第二电压源( $S_2$ ),桥臂中所有不控模块等效为四只二极管( $D_1, D_2, D_3, D_4$ )及第一电压源( $S_1$ )。所述桥臂等效电路可仿真桥臂中既包含不控模块又包含受控模块工况下的电磁暂态过程,实现全桥结构模块化多电平换流器在不控状态、受控状态、少数模块发生故障状态下的快速仿真。



1. 一种全桥结构模块化多电平换流器桥臂等效电路,其特征在于,所述的桥臂等效电路包括四只二极管(D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>、D<sub>3</sub>、D<sub>4</sub>),二个电压源(S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>),桥臂电抗(X<sub>1</sub>),以及桥臂上下端接线端子(A<sub>+</sub>、A<sub>-</sub>);其中,第一二极管(D<sub>1</sub>)的阳极与第二二极管(D<sub>2</sub>)的阴极相连接,连接点为桥臂上端正接线端子(A<sub>+</sub>);第一二极管(D<sub>1</sub>)的阴极与第三二极管(D<sub>3</sub>)的阴极及第一电压源(S<sub>1</sub>)的一端相连接,第二二极管(D<sub>2</sub>)的阳极与第四二极管(D<sub>4</sub>)的阳极及第一电压源(S<sub>1</sub>)的另一端相连接;第三二极管(D<sub>3</sub>)的阳极与第四二极管(D<sub>4</sub>)阴极及第二电压源(S<sub>2</sub>)的一端相连接;桥臂电抗(X<sub>1</sub>)的一端与第二电压源(S<sub>2</sub>)的另一端相连接,桥臂电抗(X<sub>1</sub>)的另一端为桥臂下端负接线端子(A<sub>-</sub>);所述桥臂等效电路中,第一电压源(S<sub>1</sub>)的电压为桥臂中所有不控全桥功率模块电容电压之和,第二电压源(S<sub>2</sub>)的电压为桥臂中所有受控全桥功率模块输出电压之和;

所述桥臂等效电路能够描述桥臂中既包含不控全桥功率模块又包含受控全桥功率模块的电磁暂态过程,实现全桥结构模块化多电平换流器在不控状态、受控状态以及少数全桥功率模块发生故障状态工况下的仿真;

所述的全桥结构模块化多电平换流器桥臂中所有不控全桥功率模块由四只二极管(D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>、D<sub>3</sub>、D<sub>4</sub>)和第一电压源(S<sub>1</sub>)表示,模拟桥臂中所有不控全桥功率模块的电磁暂态过程;当全桥结构模块化多电平换流器桥臂中没有受控全桥功率模块时,所述的桥臂等效电路实现桥臂在不控工况下的电磁暂态仿真;

所述的等效电路模拟的桥臂中所有不控全桥功率模块的电磁暂态过程如下:

所述的全桥结构模块化多电平换流器中,第一电压源的电压U<sub>S1</sub>为桥臂中所有不控全桥功率模块电容电压U<sub>C1</sub>,U<sub>C2</sub>,...,U<sub>CM</sub>之和,假设桥臂有M个不控全桥功率模块,M≥1且为整数,

$$U_{S1} = U_{C1} + U_{C2} + \dots + U_{CM}$$

每个全桥功率模块电容的电压U<sub>C</sub>经下式计算得出:

$$U_C(k+1) = U_C(k) + |i_a| T_s C_f$$

其中,U<sub>C</sub>(k)为第k拍的每个全桥功率模块的模块电容电压计算值,U<sub>C</sub>(k+1)为第k+1拍的每个全桥功率模块的模块电容电压计算值,i<sub>a</sub>为桥臂电流,C<sub>f</sub>为每个全桥功率模块电容值,T<sub>s</sub>为计算步长;

所述的全桥结构模块化多电平换流器桥臂中所有受控全桥功率模块的电磁暂态过程由第二电压源(S<sub>2</sub>)表示;当全桥结构模块化多电平换流器桥臂中没有不控模块时,所述的桥臂等效电路实现桥臂在受控工况下的电磁暂态仿真;

所述的桥臂等效电路模拟桥臂中所有受控全桥功率模块的电磁暂态过程如下:

所述的第二电压源的电压U<sub>S2</sub>为桥臂中所有受控全桥功率模块输出电压U<sub>C01</sub>,U<sub>C02</sub>,...,U<sub>C0P</sub>之和,假设桥臂具有P个受控全桥功率模块,P≥1且为整数:

$$U_{S2} = U_{C01} + U_{C02} + \dots + U_{C0P}$$

每个全桥功率模块的输出电压U<sub>C0</sub>由每个全桥功率的模块电容电压U<sub>C</sub>及第一开关器件(K<sub>1</sub>)、第二开关器件(K<sub>2</sub>)、第三开关器件(K<sub>3</sub>)和第四开关器件(K<sub>4</sub>)的开关状态决定,具体如下:

当第一开关器件(K<sub>1</sub>)和第四开关器件(K<sub>4</sub>)为开通状态,第二开关器件(K<sub>2</sub>)和第三开关器件(K<sub>3</sub>)为关闭状态,全桥功率模块输出电压为U<sub>C</sub>;当第一开关器件(K<sub>1</sub>)和第四开关器件(K<sub>4</sub>)为关闭状态,第二开关器件(K<sub>2</sub>)和第三开关器件(K<sub>3</sub>)为开通状态,全桥功率模块输出电

压为 $-U_c$ ；第一开关器件(K<sub>1</sub>)和第三开关器件(K<sub>3</sub>)为开通状态，第二开关器件(K<sub>2</sub>)和第四开关器件(K<sub>4</sub>)为关闭状态，全桥功率模块输出电压为0；第一开关器件(K<sub>1</sub>)和第三开关器件(K<sub>3</sub>)为关闭状态，第二开关器件(K<sub>2</sub>)和第四开关器件(K<sub>4</sub>)为开通状态，全桥功率模块输出电压为0。

2. 如权利要求1所述的全桥结构模块化多电平换流器桥臂等效电路，其特征在于所述的全桥功率模块的电容电压 $U_c$ 经下式计算得出：

$$U_c(k+1) = U_c(k) + f_x(i_a) T_s C_f$$

其中， $U_c(k)$ 为每个全桥功率模块的电容电压第k拍计算值， $U_c(k+1)$ 为每个全桥功率模块的电容电压第k+1拍计算值， $i_a$ 为桥臂电流， $C_f$ 为每个全桥功率模块的电容值， $T_s$ 为计算步长， $f_x$ 为电容电流计算方法；

所述的电容电流计算方法 $f_x$ 为，当第一开关器件(K<sub>1</sub>)和第四开关器件(K<sub>4</sub>)为开通状态，第二开关器件(K<sub>2</sub>)和第三开关器件(K<sub>3</sub>)为关闭状态，全桥功率模块的电容电流为 $i_a$ ；当第一开关器件(K<sub>1</sub>)和第四开关器件(K<sub>4</sub>)为关闭状态，第二开关器件(K<sub>2</sub>)和第三开关器件(K<sub>3</sub>)为开通状态，每个全桥功率模块的电容电流为 $-i_a$ ；第一开关器件(K<sub>1</sub>)和第三开关器件(K<sub>3</sub>)为开通状态，第二开关器件(K<sub>2</sub>)和第四开关器件(K<sub>4</sub>)为关闭状态，全桥功率模块的电容电流为0；第一开关器件(K<sub>1</sub>)和第三开关器件(K<sub>3</sub>)为关闭状态，第二开关器件(K<sub>2</sub>)和第四开关器件(K<sub>4</sub>)为开通状态，全桥功率模块的电容电流为0。

## 一种全桥结构模块化多电平换流器桥臂等效电路

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种全桥结构模块化多电平换流器的桥臂等效电路。

### 背景技术

[0002] 基于模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 的高压柔性直流输电系统 (VSC-HVDC) 具有四象限运行、滤波器小、可向无源网络供电等诸多优点,其在输电领域获得了广泛关注。现有模块化多电平换流器电路拓扑有半桥结构和全桥结构两种类型。

[0003] 对于半桥结构模块化多电平换流器,当直流侧出现短路故障时,其交流电源、绝缘栅双极型晶闸管 (IGBT) 反并联二极管与直流短路点将构成短路回路,造成模块化多电平换流器系统严重过流。由于目前高压直流断路器技术并不成熟,其直流短路保护通过并联晶闸管分流并切除交流侧断路器实现。这种方法仅实用于电压等级较低且容量较小的模块化多电平换流器。例如±160kV直流电压200MW容量的南澳柔性直流输电系统,其模块化多电平换流器直流短路电流约为3kA,该电流等级为目前晶闸管可承受范围之内。然而对于未来高电压且大容量柔性直流输电系统,由于其电压等级高需采用架空线,导致了直流侧发生短路故障概率大大增加。当采用半桥结构模块化多电平换流器,直流侧短路故障的短路电流已经超过现有器件最大承受能力,导致模块化多电平换流器灾难性的损坏。例如,±500kV直流电压3000MW容量的柔性直流输电系统,当采用半桥模块化多电平换流器时其短路电流可达到100kA等级,然而目前电力电子器件无法承受如此大的短路电流。

[0004] 全桥结构模块化多电平换流器不同于半桥结构模块化多电平换流器,这是因为半桥功率模块只能输出零电压或正电压,而全桥功率模块可输出零电压、正电压和负电压三种,因此全桥结构模块化多电平换流器具备直流侧短路故障隔离能力,该优点对于未来采用架空线的高电压且大容量柔性直流输电系统具有十分重要作用。然而全桥结构模块化多电平换流器的开关器件数量比半桥结构模块化多电平换流器多了一倍,其电路结点数及器件数量也相应的增加了一倍,实现全桥结构模块化多电平换流器的全过程快速仿真具有较大困难。

[0005] 为了解决全桥结构模块化多电平换流器快速仿真问题,专利CN102663174B将全桥结构模块化多电平换流器的桥臂等效为一个由受控电压源以及可调电阻构成的简单电路,该方法由桥臂电流的方向来调整可调电阻的阻值。方法在不控充电结束时,桥臂电流正负波动可能引起仿真回路的震荡。专利CN103593521A提出了在全桥结构模块化多电平换流器闭锁阶段中,对开关器件导通状态在两个仿真时刻之间发生变化的问题进行了附加开关器件处理,该方法对模型进行可控状态与不控状态的切换增加了复杂度,且也不能仿真桥臂中有少数模块发生故障的工况。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的是克服现有方法的不足,提出一种全桥结构模块化多电平换流器桥

臂等效电路。

[0007] 本发明可应用于高电压大容量柔性直流输电工程的全桥结构模块化多电平换流器的快速仿真,可同时仿真桥臂中既包含不控模块又包含受控模块工况下的电磁暂态过程,实现全桥结构模块化多电平换流器在不控状态、受控状态、少数模块发生故障状态下的快速仿真。

[0008] 本发明的桥臂等效电路包括四只二极管、二个电压源、桥臂电抗以及桥臂上下端接线端子。其中,第一二极管的阳极与第二二极管的阴极的连接,其连接点为桥臂上端正接线端子;第一二极管的阴极与第三二极管的阴极及第一电压源的一端相连接,第二二极管的阳极与第四二极管的阳极及第一电压源的一端相连接,第三二极管的阳极与第四二极管的阴极及第二电压源的一端相连接;桥臂电抗的一端与第一电压源的另一端相连接,桥臂电抗的另一端为桥臂下端负接线端子。所述桥臂等效电路中,第一电压源的电压为桥臂中所有不控全桥功率模块电容电压之和,第二电压源的电压为桥臂中所有受控全桥功率模块输出电压之和。

[0009] 本发明在各种工况下模块化多电平换流器实现电磁暂态仿真方法如下:

[0010] (1) 不控工况下的电磁暂态仿真

[0011] 全桥结构模块化多电平变流器中每个桥臂所有不控全桥功率模块由四只二极管和第一电压源表示。第一电压源的电压 $U_{S1}$ 为桥臂中所有不控全桥功率模块电容电压 $U_{C1}, U_{C2}, \dots, U_{CM}$ 之和,假设桥臂有 $M$ 个不控全桥功率模块, $M \geq 1$ 且为整数。

[0012]  $U_{S1} = U_{C1} + U_{C2} + \dots + U_{CM}$

[0013] 每个全桥功率模块电容的电压 $U_c$ 经下式计算得出:

[0014]  $U_c(k+1) = U_c(k) + |i_a| T_s C_f$

[0015] 其中, $U_c(k)$ 为第 $k$ 拍的每个模块的电容电压计算值, $U_c(k+1)$ 为第 $k+1$ 拍的每个模块的电容电压计算值, $i_a$ 为桥臂电流, $C_f$ 为每个全桥功率模块的电容值, $T_s$ 为计算步长。

[0016] 本发明等效电路可模拟所有不控全桥功率模块的电磁暂态过程,当桥臂中没有受控模块时,本发明等效电路可实现桥臂在不控工况下的电磁暂态仿真。

[0017] (2) 受控工况下的电磁暂态仿真

[0018] 全桥结构模块化多电平换流器中每个桥臂所有受控全桥功率模块由第二电压源表示,第二电压源的电压 $U_{S2}$ 为桥臂中所有受控功率全桥功率模块输出电压 $U_{CO1}, U_{CO2}, \dots, U_{COP}$ 之和,假设桥臂具有 $P$ 个受控全桥功率模块, $P \geq 1$ 且为整数:

[0019]  $U_{S2} = U_{CO1} + U_{CO2} + \dots + U_{COP}$

[0020] 每个模块的输出电压 $U_{CO}$ 由每个模块电容电压 $U_c$ 及第一开关器件、第二开关器件、第三开关器件和第四开关器件的开关状态决定,分析如下:

[0021] 当第一开关器件和第四开关器件为开通状态,第二开关器件和第三开关器件为关闭状态,每个全桥功率模块输出电压为 $U_c$ ;当第一开关器件和第四开关器件为关闭状态,第二开关器件和第三开关器件为开通状态,全桥功率模块输出电压为 $-U_c$ ;第一开关器件和第三开关器件为开通状态,第二开关器件和第四开关器件为关闭状态,全桥功率模块输出电压为 $0$ ;第一开关器件和第三开关器件为关闭状态,第二开关器件和第四开关器件为开通状态,全桥功率模块输出电压为 $0$ 。

[0022] 每个全桥功率模块电容的电压由桥臂电流 $i_a$ 、每个模块的电容值 $C_f$ 、计算步长 $T_s$ ,

以及第一开关器件、第二开关器件、第三开关器件和第四开关器件的开关状态决定,每个模块电容的电压 $U_c$ 如下式:

$$[0023] \quad U_c(k+1) = U_c(k) + f_x(i_a) T_s C_f$$

[0024] 其中, $U_c(k)$ 为第 $k$ 拍的电容电压计算值, $U_c(k+1)$ 为第 $k+1$ 拍的电容电压计算值, $f_x$ 为电容电流计算方法。

[0025] 电容电流计算方法 $f_x$ 可描述为:当第一开关器件和第四开关器件为开通状态,第二开关器件和第三开关器件为关闭状态,每个全桥功率模块的电容电流为 $i_a$ ;当第一开关器件和第四开关器件为关闭状态,第二开关器件和第三开关器件为开通状态,每个全桥功率模块的电容电流为 $-i_a$ ;第一开关器件和第三开关器件为开通状态,第二开关器件和第四开关器件为关闭状态,每个全桥功率模块的电容电流为0;第一开关器件和第三开关器件为关闭状态,第二开关器件和第四开关器件为开通状态,每个全桥功率模块的电容电流为0。

[0026] 本发明等效电路可模拟桥臂中所有受控全桥功率模块的电磁暂态过程,当桥臂中没有不控模块时,本发明等效电路可实现桥臂在受控工况下的电磁暂态仿真。

[0027] (3) 故障工况下的电磁暂态仿真

[0028] 全桥结构模块化多电平换流器所有模块分为不控状态和受控状态两种,采用本发明的桥臂等效电路可同时模拟不控全桥功率模块和受控全桥功率模块的电磁暂态过程。当全桥结构模块化多电平换流器在桥臂中有少数模块发生故障时,本发明等效电路可实现桥臂在故障状态下的电磁暂态仿真。

## 附图说明

[0029] 图1为全桥结构模块化多电平换流器结构图;

[0030] 图2为全桥功率模块的内部电路原理图;

[0031] 图3为全桥结构模块化多电平换流器桥臂等效电路。

## 具体实施方式

[0032] 以下结合附图和具体实施方式进一步说明本发明。

[0033] 图1所示为全桥结构模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的结构。模块化多电平换流器的交流侧每相由上下两个桥臂组成,每个桥臂由若干个全桥功率模块及电抗器串联而成。例如AU桥臂包括一个电抗器 $X_{Au}$ 和 $N$ 个串联连接的功率模块 $AU_1 - AU_N, N \geq 1$ 。

[0034] 图2所示为全桥功率模块的内部电路原理。如图2所示,全桥功率模块包括储能电容 $C$ 、四只开关器件 $K_1、K_2、K_3、K_4$ ,以及四只二极管 $D_1、D_2、D_3、D_4$ 。其中,第一开关器件 $K_1$ 的集电极和第三开关器件 $K_3$ 的集电极连接到储能电容 $C$ 的正极,第一开关器件 $K_2$ 的发射极和第四开关器件 $K_4$ 的发射极连接到储能电容 $C$ 的负极;第一开关器件 $K_1$ 的集电极与第一二极管 $D_1$ 的阴极相连,第一开关器件 $K_1$ 的发射极与第一二极管 $D_1$ 的阳极相连;第二开关器件 $K_2$ 的集电极与第二二极管 $D_2$ 的阴极相连,第二开关器件 $K_2$ 的发射极与第二二极管 $D_2$ 的阳极相连;第三开关器件 $K_3$ 的集电极与第三二极管 $D_3$ 的阴极相连,第三开关器件 $K_3$ 的发射极与第三二极管 $D_3$ 的阳极相连;第四开关器件 $K_4$ 的集电极与第四二极管 $D_4$ 的阴极相连,第四开关器件 $K_4$ 的发射极与第四二极管 $D_4$ 的阳极相连;第一开关器件 $K_1$ 的发射极与第二开关器件 $K_2$ 的集电极连接在

到全桥功率模块的输出端子E,第三开关器件K<sub>3</sub>的发射极与第四开关器件K<sub>4</sub>的集电极连接到全桥功率模块的输出端子F;U<sub>0</sub>为全桥功率模块输出电压,i<sub>a</sub>为桥臂电流。

[0035] 图3所示为本发明的等效电路。全桥结构模块化多电平换流器快速仿真模型桥臂等效电路包括四只二极管D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>、D<sub>3</sub>和D<sub>4</sub>,二只电压源S<sub>1</sub>和S<sub>2</sub>,桥臂电抗X<sub>1</sub>,以及桥臂上下端接线端子A<sub>+</sub>和A<sub>-</sub>。其中,第一二极管D<sub>1</sub>的阳极与第二二极管D<sub>2</sub>的阴极相连接,连接点为桥臂上端的正接线端子A<sub>+</sub>;第一二极管D<sub>1</sub>的阴极与第三二极管D<sub>3</sub>的阴极及第一电压源S<sub>1</sub>的一端相连接,第二二极管D<sub>2</sub>的阳极与第四二极管D<sub>4</sub>的阳极及第一电压源S<sub>1</sub>的另一端相连接;第三二极管D<sub>3</sub>的阳极与第四二极管D<sub>4</sub>的阴极及第二电压源S<sub>2</sub>的一端相连接,桥臂电抗X<sub>1</sub>的一端与第一电压源S<sub>1</sub>的另一端相连接,桥臂电抗X<sub>1</sub>的另一端为桥臂下端的负接线端子连接A<sub>-</sub>。所述桥臂等效电路中,第一电压源S<sub>1</sub>为不控全桥功率模块电容电压之和,第二电压源S<sub>2</sub>为所有受控全桥功率模块输出电压之和。

[0036] 本发明在各种工况下模块化多电平换流器实现电磁暂态仿真方法如下:

[0037] (1) 不控工况下的电磁暂态仿真

[0038] 全桥结构模块化多电平中每个桥臂所有不控全桥功率模块由四只二极管D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>、D<sub>3</sub>、D<sub>4</sub>和第一电压源S<sub>1</sub>表示。第一电压源S<sub>1</sub>的电压U<sub>S1</sub>为桥臂中所有不控全桥功率模块电容电压U<sub>C1</sub>,U<sub>C2</sub>,...,U<sub>CM</sub>之和,假设桥臂有M个不控全桥功率模块,M≥1且为整数。

[0039]  $U_{S1} = U_{C1} + U_{C2} + \dots + U_{CM}$

[0040] 每个模块电容的电压U<sub>C</sub>经下式计算得出:

[0041]  $U_C(k+1) = U_C(k) + |i_a| T_s C_f$

[0042] 其中,U<sub>C</sub>(k)为第k拍计算值,U<sub>C</sub>(k+1)为第k+1拍计算值,i<sub>a</sub>为桥臂电流,C<sub>f</sub>为电容值,T<sub>s</sub>为计算步长。

[0043] 本发明等效电路可模拟所有不控全桥功率模块的电磁暂态过程,当桥臂中没有受控模块时,可实现桥臂在不控工况下的电磁暂态仿真。

[0044] (2) 受控工况下的电磁暂态仿真

[0045] 全桥结构模块化多电平换流器中每个桥臂所有受控全桥功率模块由第二电压源S<sub>2</sub>表示,第二电压源S<sub>2</sub>的电压U<sub>S2</sub>为桥臂中所有受控全桥功率模块输出电压U<sub>C01</sub>,U<sub>C02</sub>,...,U<sub>C0P</sub>之和,假设桥臂具有P个受控全桥功率模块,P≥1且为整数:

[0046]  $U_{S2} = U_{C01} + U_{C02} + \dots + U_{C0P}$

[0047] 每个模块的输出电压U<sub>C0</sub>由模块电容电压U<sub>C</sub>及第一开关器件K<sub>1</sub>、第二开关器件K<sub>2</sub>、第三开关器件K<sub>3</sub>和第四开关器件K<sub>4</sub>的开关状态决定,分析如下:

[0048] 当第一开关器件K<sub>1</sub>和第四开关器件K<sub>4</sub>为开通状态,第二开关器件K<sub>2</sub>和第三开关器件K<sub>3</sub>为关闭状态,全桥功率模块输出电压U<sub>C0</sub>=U<sub>C</sub>;当第一开关器件K<sub>1</sub>和第四开关器件K<sub>4</sub>为关闭状态,第二开关器件K<sub>2</sub>和第三开关器件K<sub>3</sub>为开通状态,全桥功率模块输出电压U<sub>C0</sub>=-U<sub>C</sub>;第一开关器件K<sub>1</sub>和第三开关器件K<sub>3</sub>为开通状态,第二开关器件K<sub>2</sub>和第四开关器件K<sub>4</sub>为关闭状态,全桥功率模块输出电压U<sub>C0</sub>=0;第一开关器件K<sub>1</sub>和第三开关器件K<sub>3</sub>为关闭状态,第二开关器件K<sub>2</sub>和第四开关器件K<sub>4</sub>为开通状态,全桥功率模块输出电压U<sub>C0</sub>=0。

[0049] 所述的模块电容电压U<sub>C</sub>经下式计算得出:

[0050]  $U_C(k+1) = U_C(k) + f_x(i_a) T_s C_f$

[0051] 其中,U<sub>C</sub>(k)为第k拍计算值,U<sub>C</sub>(k+1)为第k+1拍计算值,i<sub>a</sub>为桥臂电流,C<sub>f</sub>为电容

值,  $T_s$  为计算步长,  $f_x$  为计算方法。

[0052] 电容电流计算方法  $f_x$  可描述为: 当第一开关器件  $K_1$  和第四开关器件  $K_4$  为开通状态, 第二开关器件  $K_2$  和第三开关器件  $K_3$  为关闭状态, 电容电流为  $i_a$ ; 当第一开关器件  $K_1$  和第四开关器件  $K_4$  为关闭状态, 第二开关器件  $K_2$  和第三开关器件  $K_3$  为开通状态, 电容电流为  $-i_a$ ; 第一开关器件  $K_1$  和第三开关器件  $K_3$  为开通状态, 第二开关器件  $K_2$  和第四开关器件  $K_4$  为关闭状态, 电容电流为 0; 第一开关器件  $K_1$  和第三开关器件  $K_3$  为关闭状态, 第二开关器件  $K_2$  和第四开关器件  $K_4$  为开通状态, 电容电流为 0。

[0053] 该等效电路可模拟桥臂中所有受控全桥功率模块的电磁暂态过程, 当桥臂中没有不控模块时, 可实现桥臂在受控工况下的电磁暂态仿真。

[0054] (3) 故障工况下的电磁暂态仿真

[0055] 全桥结构模块化多电平换流器所有模块分别不控状态和受控状态两种, 采用本发明的桥臂等效电路可同时模拟不控全桥功率模块和受控全桥功率模块的电磁暂态过程。对全桥结构模块化多电平换流器, 可实现少数模块发生故障状态、不控状态、受控状态工况下的快速仿真。



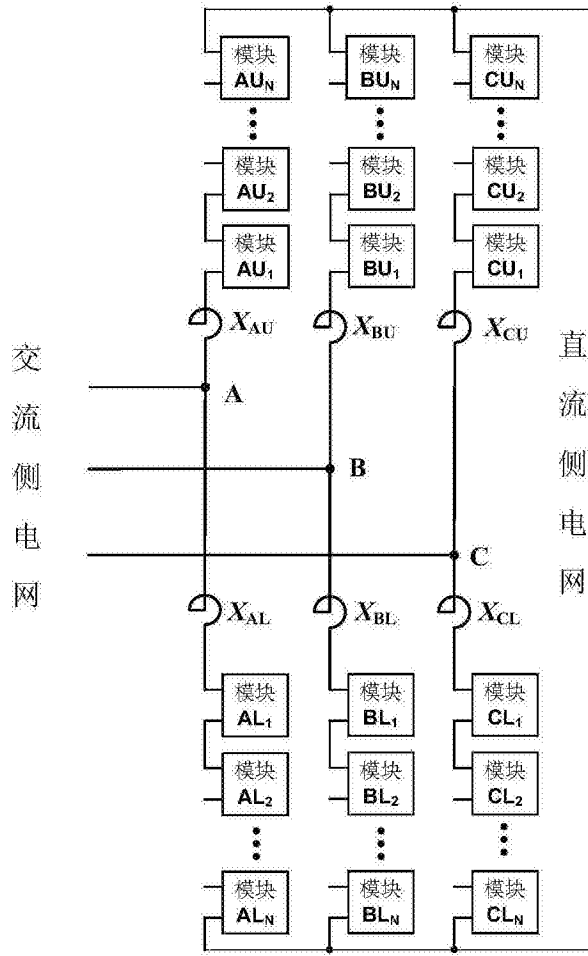


图1

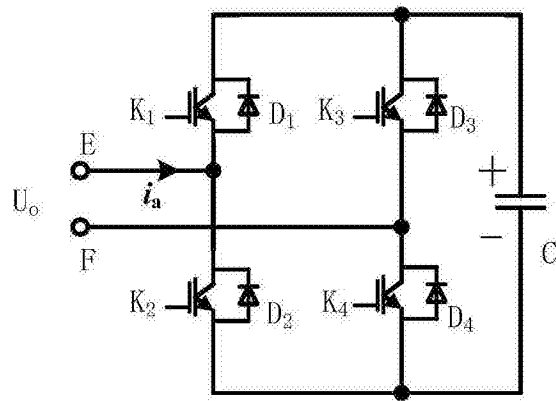


图2

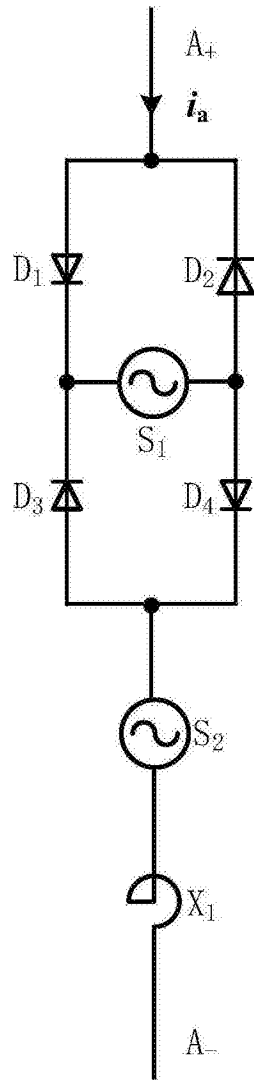


图3