



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105675957 B

(45)授权公告日 2018.07.20

(21)申请号 201610046046.6

G01R 31/02(2006.01)

(22)申请日 2016.01.22

(56)对比文件

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 105675957 A

CN 104218833 A, 2014.12.17,

CN 104597370 A, 2015.05.06,

CN 102495292 A, 2012.06.13,

CN 103235219 A, 2013.08.07,

US 2012001618 A1, 2012.01.05,

(43)申请公布日 2016.06.15

(73)专利权人 东南大学  
地址 210018 江苏省南京市玄武区四牌楼2号

罗程等.MMC控制系统时序逻辑与子模块故障监测.《电力自动化设备》.2015,第35卷(第5期),第83页-第88页.

(72)发明人 李东野 赵剑锋 季振东 苏嘉彬 陈璐瑶

审查员 李佳

(74)专利代理机构 南京苏高专利商标事务所  
(普通合伙) 32204

代理人 娄嘉宁

(51)Int.Cl.

G01R 19/00(2006.01)

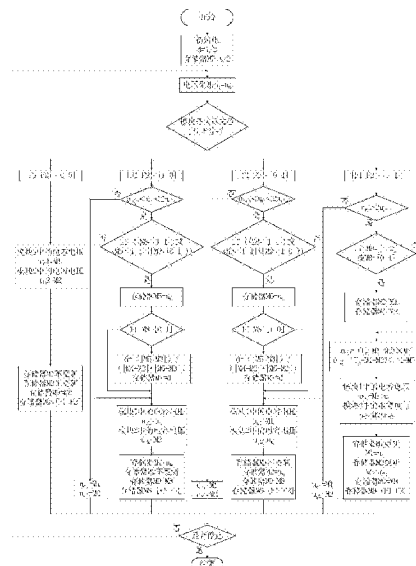
权利要求书3页 说明书8页 附图5页

(54)发明名称

一种基于状态监测的MMC模块电压测量和故障定位方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于状态监测的MMC模块电压测量和故障定位方法,本发明提供的方法中电压采集点选在两个相邻的串联单电容模块或双电容模块的输出端口,一个电压传感器或测量电路可测两个模块电压,大幅节省了传感器或电路数量,降低了硬件成本和复杂度。该测量方法能进行电压校正,避免因电容值等参数不同而造成的误差,依据该方法所得的电压和所监测的模块状态可判断模块是否故障,系统根据故障模块发出的故障信号定位该模块。该模块电压测量及故障定位方法在模块控制器中实现,不增加主控制器计算负担同时降低了硬件要求。该模块电压测量及故障模块定位方法适用于采用含较多模块MMC的高压大功率场合,如能源互联网,高压直流输电等领域。



CN 105675957 B

1. 一种基于状态监测的MMC模块电压测量方法,其特征在于:包括以下步骤:

步骤101:将电压传感器或电压采样电路设置在两个相邻串联的单电容模块的输出端口或者双电容模块的输出端口,此输出端口为采样点;两个相邻串联的单电容模块或双电容模块中两个模块分别表示为模块1和模块2;

步骤102:模块电压测量初始化,设置每个模块电压最大门限值 $u_{ci\maxref}$ ,模块电压的最小判断门限值 $u_{min}$ ,电压校正系数 $d$ 的初始值,并在MMC系统中选择9个存储器存储相应参数;

步骤103:电压传感器或电压采样电路开始测量采样点电压 $u_m$ ;

步骤104:确定两个相邻串联的单电容模块的运行状态或双电容模块中两个分模块的运行状态,结合步骤103中获得的采样点电压 $u_m$ 获得每个模块的电容电压值;其中,用F1表示模块1的运行状态变量,F2表示模块2的运行状态变量;

步骤105:判断控制是否结束,如果MMC系统的主控制器没有发出控制结束指令则根据系统控制信号,继续循环进行步骤103~步骤104测量模块电压;如果MMC系统的主控制器发出控制结束指令,则结束控制。

2. 根据权利要求1所述的基于状态监测的MMC模块电压测量方法,其特征在于:所述步骤104中所述获得每个模块的电容电压值的方法为:

当 $F1=0$ 且 $F2=0$ 时,模块1中的电容电压 $u_{c1}=M1$ ,M1表示第一存储器中的值,第一存储器用于记录模块1中电容电压的值,模块2中的电容电压 $u_{c2}=M2$ ,M2表示第二存储器中的值,第二存储器用于记录模块2中电容电压的值;第一存储器和第二存储器中的值不更新;同时,将第八存储器中的值存储到第九存储器中,第八存储器中存储当前的第一模块和第二模块的状态值;其中,第八存储器用于记录一次运行状态变化前第一模块和第二模块的状态值,用M8表示第八存储器中的值;第九存储器用于记录两次运行状态变化前第一模块和第二模块的状态值,用M9表示第九存储器中的值;

当 $F1=1$ 且 $F2=0$ 时,判断采样点处的电压 $u_m$ 的范围,如果 $u_m \leq u_{min}$ 或 $u_m \geq 2u_{min}$ ,模块1中的电容电压 $u_{c1}=M1$ ,模块2中的电容电压 $u_{c2}=M2$ ,第一存储器和第二存储器中的值不更新,继续进行检测;如果 $u_{min} < u_m < 2u_{min}$ ,判断前一次运行状态是否为 $F1=1$ 且 $F2=1$ 或前一次运行状态为 $F1=0$ 且 $F2=1$ 的同时前两次运行状态为 $F1=1$ 且 $F2=1$ ,如果符合两种情况中的一种,则将此时采样点处的电压 $u_m$ 存储到第五存储器中,M5表示第五存储器中的值;如果前一次运行状态为 $F1=0$ 且 $F2=1$ ,计算校正系数 $d$ 并更新原来的校正系数,第七存储器用于存储校正系数 $d$ 的值,M7表示第七存储器中的值;此时模块1中的电容电压 $u_{c1}$ 为此次采样点处的电压值 $u_m$ ,模块2中的电容电压 $u_{c2}$ 不变;更新第一存储器中的值,并将第八存储器中的值存储到第九存储器中,第八存储器中存储当前的第一模块和第二模块的状态值;

当 $F1=0$ 且 $F2=1$ 时,判断采样点处的电压 $u_m$ 的范围,如果 $u_m \leq u_{min}$ 或 $u_m \geq 2u_{min}$ ,模块1中的电容电压 $u_{c1}=M1$ ,模块2中的电容电压 $u_{c2}=M2$ ,第一存储器和第二存储器中的值不更新,继续进行检测;如果 $u_{min} < u_m < 2u_{min}$ ,判断前一次运行状态是否为 $F1=1$ 且 $F2=1$ 或前一次运行状态为 $F1=1$ 且 $F2=0$ 的同时前两次运行状态为 $F1=1$ 且 $F2=1$ ,如果符合两种情况中的一种,则将此时采样点处的电压 $u_m$ 存储到第六存储器中,M6表示第六存储器中的值;如果前一次运行状态为 $F1=1$ 且 $F2=0$ ,计算校正系数 $d$ 并更新原来的校正系数,并将更新后的值存储到第七存储器中;此时模块2中的电容电压 $u_{c2}$ 为此次采样点处的电压值 $u_m$ ,模块1中的电容电压 $u_{c1}$ 不变;更新第二存储器中的值,并将第八存储器中的值存储到第九存储器中,第八存储器中存

储当前的第一模块和第二模块的状态值；

当 $F1=1$ 且 $F2=1$ 时,判断测量电压 $u_m$ 的范围,如果 $u_m \leq 2u_{min}$ 时,模块1中的电容电压 $u_{c1}=M1$ ,模块2中的电容电压 $u_{c2}=M2$ ,第一存储器和第二存储器中的值不更新,继续进行检测;如果 $u_m > 2u_{min}$ ,判断前一次运行状态是否为 $F1=1$ 且 $F2=0$ 或 $F1=0$ 且 $F2=1$ ,如果符合两种情况中的一种,则将此时第一存储器中的值存储到第三存储器中,将此时第二存储器中的值存储到第四存储器中,用 $M3$ 表示第三存储器中的值, $M4$ 表示第四存储器中的值;存储器 $M3=M1$ ,存储器 $M4=M2$ ,并计算模块1的电压变化量 $u_{v1}$ 和模块2的电压变化量 $u_{v2}$ ;如果不符合两种情况,直接计算模块1的电压变化量 $u_{v1}$ 和模块2的电压变化量 $u_{v2}$ ,此时,模块1中的电容电压 $u_{c1}=M1+u_{v1}$ ,模块2中的电容电压 $u_{c2}=M2+u_{v2}$ ;并更新模块1和模块2的电容电压存储值;更新第一存储器和第二存储器中的值,并将第八存储器中的值存储到第九存储器中,第八存储器中存储当前的第一模块和第二模块的状态值。

3. 根据权利要求2所述的基于状态监测的MMC模块电压测量方法,其特征在于:当MMC正常运行时,所述步骤104中两个相邻串联的单电容模块的运行状态或双电容模块中两个模块的运行状态根据每个模块中的开关器件的导通或关断的状态进行判断。

4. 根据权利要求2所述的基于状态监测的MMC模块电压测量方法,其特征在于:当MMC发生高压直流侧短路故障时,所述步骤104中两个相邻串联的单电容模块的运行状态或双电容模块中两个模块的运行状态根据每个模块拓扑和经过该模块的电流方向进行设定。

5. 根据权利要求4所述的基于状态监测的MMC模块电压测量方法,其特征在于:获得所述电流方向的方法为:取最近两次获得的模块的电容电压值,用最后一次获得的模块电容电压值减去倒数第二次获得的电容电压值,根据获得结果的正负值判断经过该模块的电流方向,如果为正则电流正向流入,如果为负则电流反向流入。

6. 根据权利要求4所述的基于状态监测的MMC模块电压测量方法,其特征在于:获得所述电流方向的方法为:将各桥臂电流测量电路得到的电流值,经由MMC主控制器发送给模块控制器进行电流的方向的判断。

7. 根据权利要求1所述的基于状态监测的MMC模块电压测量方法,其特征在于:所述采样点电压 $u_m$ 的采集频率不小于测量的模块等效开关频率最高值的两倍。

8. 根据权利要求1所述的基于状态监测的MMC模块电压测量方法,其特征在于:所述模块电压最大门限值 $u_{cimmaxref}$ 为1.2倍的单个电容电压额定值,最小判断门限值 $u_{min}$ 为0.8倍的单个电容电压额定值。

9. 一种基于权利要求1所述的基于状态监测的MMC模块电压测量方法的故障定位方法,其特征在于:包括以下步骤:

步骤201:模块故障定位初始化,在MMC系统中选择多个计数器用于记录检测到开路故障的次数,并给每个计数器赋初值;

步骤202:电压传感器或电压采样电路开始测量采样点电压 $u_m$

步骤203:同时进行短路故障和开路故障的判断,其中短路故障判断通过检测每个模块是否存在IGBT短路保护信号 $s(i)$ , $i=1,2$ , $i$ 表示模块的编号;如果有 $s(i)$ 信号,则模块 $i$ 发生短路故障;开路故障结合采样点处的电压值 $u_m$ 和每个模块的运行状态进行判断;

步骤204:判断控制是否结束,如果MMC系统的主控制器没有发出控制结束指令则根据系统控制信号,继续循环进行步骤202~203进行故障的检测和定位;如果MMC系统的主控制

器发出控制结束指令,则结束控制。

10. 根据权利要求9所述的故障定位方法,其特征在于:所述步骤203中开路故障的判断条件为:

当 $F1=0$ 且 $F2=0$ 时,如果 $u_m \leq u_{min}$ ,继续进行检测,如果 $u_m > u_{min}$ ,说明模块1或模块2中至少存在一个开路故障,继续分别比较每个模块中的电容电压与每个模块的最大门限的大小,如果每个模块中的电容电压 $u_{ci}$ 均小于对应模块的最大门限 $u_{cimaxref}$ ,则继续进行检测,如果第 $i$ 个模块中的电容电压 $u_{ci}$ 大于对应模块的最大门限 $u_{cimaxref}$ ,则连续检测三次,如果三次检测的结果均是第 $i$ 个模块中的电容电压 $u_{ci}$ 大于对应模块的最大门限 $u_{cimaxref}$ ,则模块 $i$ 存在开路故障;

当 $F1=1$ 且 $F2=0$ 时,如果 $u_m \geq u_{min}$ ,判断 $u_m$ 是否大于 $2u_{min}$ ,如果 $u_m \leq 2u_{min}$ ,则继续检测,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 均大于 $2u_{min}$ ,则模块2存在开路故障,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 没有均大于 $2u_{min}$ ,则继续检测;如果 $u_m < u_{min}$ ,连续采样采样点处的电压 $u_m$ ,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 均小于 $u_{min}$ ,则模块1存在开路故障,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 没有均小于 $u_{min}$ ,则继续检测;

当 $F1=0$ 且 $F2=1$ 时,如果 $u_m \geq u_{min}$ ,判断 $u_m$ 是否大于 $2u_{min}$ ,如果 $u_m \leq 2u_{min}$ ,则继续检测,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 均大于 $2u_{min}$ ,则模块1存在开路故障,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 没有均大于 $2u_{min}$ ,则继续检测;如果 $u_m < u_{min}$ ,连续采样采样点处的电压 $u_m$ ,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 均小于 $u_{min}$ ,则模块2存在开路故障,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 没有均小于 $u_{min}$ ,则继续检测;

当 $F1=1$ 且 $F2=1$ 时,如果 $u_m \geq 2u_{min}$ ,继续进行检测,如果 $u_m < 2u_{min}$ ,说明模块1或模块2中至少存在一个开路故障,继续分别比较每个模块中的电容电压与每个模块的最大门限的大小,如果每个模块中的电容电压 $u_{ci}$ 均小于对应模块的最大门限 $u_{cimaxref}$ ,则继续进行检测,如果第 $i$ 个模块中的电容电压 $u_{ci}$ 大于对应模块的最大门限 $u_{cimaxref}$ ,则连续检测三次,如果三次检测的结果均是第 $i$ 个模块中的电容电压 $u_{ci}$ 大于对应模块的最大门限 $u_{cimaxref}$ ,则模块 $i$ 存在开路故障。

## 一种基于状态监测的MMC模块电压测量和故障定位方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于电力电子应用技术领域,特别设计一种基于状态监测的MMC模块电压测量和故障定位方法。

### 背景技术

[0002] 随着经济的快速发展、社会生产规模的逐步扩大,各种形式的电力需求不断增长,对电力电子设备的要求也越来越高,电力电子技术随之飞速发展,其中多电平变换器因具有输出电压高、谐波含量低、电压变化率小、功率开关器件电压应力小、开关频率低等优点正逐渐成为高压大功率电力应用领域的研究热点。随着全控型电力电子器件耐压等级和容量的不断提升,使得采用绝缘栅双极型晶体管构成的多种电压源变换器并应用于高压大功率场合成为可能。其中模块化多电平变换器(modular multilevel converter,下文简称MMC)如图1所示,因为具有高度模块化结构而易于扩容,具有公共直流母线可以提高系统可靠性且有利于降低成本,对系统主回路的杂散参数不敏感而易于实现,不平衡运行能力、故障穿越和恢复能力强,输出波形好等优点,使得其较传统的两电平或三电平变换器具有一系列优点,所以是近期国内外的研究焦点。

[0003] MMC中因为含有较多的模块,电压等级较高时一个桥臂甚至能达到数百个模块串联,而每个模块的电容电压又是系统控制所必须采集的重要参数,所以就意味着需要较多的电压传感器或电压测量电路等硬件设施,系统的硬件成本和复杂度较高。模块电压是MMC系统运行需要采集的参数中数量最多的,因此如能在模块电压测量方面降低硬件复杂度,将有助于系统的可靠运行。MMC中也因含有大量的模块,很有可能有某一个或多个模块在同一桥臂或不同桥臂发生故障,有时甚至是同时发生故障,故障一旦发生都会对系统正常运行产生影响,如果不能及时发现故障模块并将其排除,严重时则必须使整个系统停止运行,如何快速准确的判断和定位出哪一个模块发生故障是十分重要的。特别地是随着对MMC研究的深入,为了使MMC应对直流故障等原因而出现的双电容模块,找到一种适用于该模块的电压测量和故障判断定位方法是十分有必要的。

[0004] 现有的模块电压测量方法都是对每个模块的电容电压直接进行测量,一方面使得每个模块都要有相应的电压传感器或电压测量电路,硬件复杂度和成本都很大,另一方面测量的往往都是模块中电容的电压,对模块中开关器件的故障只能通过电容电压变化进行判断,现有的故障模块定位方法也是根据这个方法,因此对故障模块的发现需要一定的时间等待模块中电容电压的变化,如果时间过长故障模块对系统的影响将会变大。

### 发明内容

[0005] 发明目的:为了克服现有技术的不足,本发明提供了一种能够在短时间内快速准确的获得模块中电容电压的基于状态监测的MMC模块电压测量方法。

[0006] 技术方案:本发明提供了一种基于状态监测的MMC模块电压测量方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤101:将电压传感器或电压采样电路设置在两个相邻串联的单电容模块的输出端口或者双电容模块的输出端口,此输出端口为采样点;两个相邻串联的单电容模块或双电容模块中两个模块分别表示为模块1和模块2;

[0008] 步骤102:模块电压测量初始化,设置每个模块电压最大门限值 $U_{cimaxref}$ ,模块电压的最小判断门限值 $u_{min}$ ,电压校正系数 $d$ 的初始值,并在MMC系统中选择9个存储器存储相应参数;

[0009] 步骤103:电压传感器或电压采样电路开始测量采样点电压 $u_m$ ;

[0010] 步骤104:确定两个相邻串联的单电容模块的运行状态或双电容模块中两个模块的运行状态,结合步骤103中获得的采样点电压 $u_m$ 获得每个模块的电容电压值;其中,用 $F_1$ 表示模块1的运行状态变量, $F_2$ 表示模块2的运行状态变量;

[0011] 步骤105:判断控制是否结束,如果MMC系统的主控制器没有发出控制结束指令则根据系统控制信号,继续循环进行步骤103~步骤104测量模块电压;如果MMC系统的主控制器发出控制结束指令,则结束控制。

[0012] 进一步,所述步骤104中所述获得每个模块的电容电压值的方法为:

[0013] 当 $F_1=0$ 且 $F_2=0$ 时,模块1中的电容电压 $u_{c1}=M_1$ , $M_1$ 表示第一存储器中的值,第一存储器用于记录模块1中电容电压的值,模块2中的电容电压 $u_{c2}=M_2$ , $M_2$ 表示第二存储器中的值,第二存储器用于记录模块2中电容电压的值;第一存储器和第二存储器中的值不更新;同时,将第八存储器中的值存储到第九存储器中,第八存储器中存储当前的第一模块和第二模块的状态值;其中,第八存储器用于记录一次运行状态变化前第一模块和第二模块的状态值,用 $M_8$ 表示第八存储器中的值;第九存储器用于记录两次运行状态变化前第一模块和第二模块的状态值,用 $M_9$ 表示第九存储器中的值;

[0014] 当 $F_1=1$ 且 $F_2=0$ 时,判断采样点处的电压 $u_m$ 的范围,如果 $u_m \leq u_{min}$ 或 $u_m \geq 2u_{min}$ ,模块1中的电容电压 $u_{c1}=M_1$ ,模块2中的电容电压 $u_{c2}=M_2$ ,第一存储器和第二存储器中的值不更新,继续进行检测;如果 $u_{min} < u_m < 2u_{min}$ ,判断前一次运行状态是否为 $F_1=1$ 且 $F_2=1$ 或前一次运行状态为 $F_1=0$ 且 $F_2=1$ 的同时前两次运行状态为 $F_1=1$ 且 $F_2=1$ ,如果符合两种情况中的一种,则将此时采样点处的电压 $u_m$ 存储到第五存储器中, $M_5$ 表示第五存储器中的值;如果前一次运行状态为 $F_1=0$ 且 $F_2=1$ ,计算校正系数 $d$ 并更新原来的校正系数,第七存储器用于存储校正系数 $d$ 的值, $M_7$ 表示第七存储器中的值;此时模块1中的电容电压 $u_{c1}$ 为此次采样点处的电压值 $u_m$ ,模块2中的电容电压 $u_{c2}$ 不变;更新第一存储器中的值,并将第八存储器中的值存储到第九存储器中,第八存储器中存储当前的第一模块和第二模块的状态值;

[0015] 当 $F_1=0$ 且 $F_2=1$ 时,判断采样点处的电压 $u_m$ 的范围,如果 $u_m \leq u_{min}$ 或 $u_m \geq 2u_{min}$ ,模块1中的电容电压 $u_{c1}=M_1$ ,模块2中的电容电压 $u_{c2}=M_2$ ,第一存储器和第二存储器中的值不更新,继续进行检测;如果 $u_{min} < u_m < 2u_{min}$ ,判断前一次运行状态是否为 $F_1=1$ 且 $F_2=1$ 或前一次运行状态为 $F_1=1$ 且 $F_2=0$ 的同时前两次运行状态为 $F_1=1$ 且 $F_2=1$ ,如果符合两种情况中的一种,则将此时采样点处的电压 $u_m$ 存储到第六存储器中, $M_6$ 表示第六存储器中的值;如果前一次运行状态为 $F_1=1$ 且 $F_2=0$ ,计算校正系数 $d$ 并更新原来的校正系数,并将更新后的值存储到第七存储器中;此时模块2中的电容电压 $u_{c2}$ 为此次采样点处的电压值 $u_m$ ,模块1中的电容电压 $u_{c1}$ 不变;更新第二存储器中的值,并将第八存储器中的值存储到第九存储器中,第八存储器中存储当前的第一模块和第二模块的状态值;

[0016] 当 $F1=1$ 且 $F2=1$ 时,判断测量电压 $u_m$ 的范围,如果 $u_m \leq 2u_{min}$ 时,模块1中的电容电压 $u_{c1}=M1$ ,模块2中的电容电压 $u_{c2}=M2$ ,第一存储器和第二存储器中的值不更新,继续进行检测;如果 $u_m > 2u_{min}$ ,判断前一次运行状态是否为 $F1=1$ 且 $F2=0$ 或 $F1=0$ 且 $F2=1$ ,如果符合两种情况中的一种,则将此时第一存储器中的值存储到第三存储器中,将次数第二存储器中的值存储到第四存储器中,用 $M3$ 表示第三存储器中的值, $M4$ 表示第四存储器中的值;存储器 $M3=M1$ ,存储器 $M4=M2$ 并计算模块1的电压变化量 $u_{v1}$ 和模块2的电压变化量 $u_{v2}$ ;如果不符合两种情况,直接计算模块1的电压变化量 $u_{v1}$ 和模块2的电压变化量 $u_{v2}$ ,此时,模块1中的电容电压 $u_{c1}=M1+u_{v1}$ ,模块2中的电容电压 $u_{c2}=M2+u_{v2}$ ;并更新模块1和模块2的电容电压存储值;更新第一存储器和第二存储器中的值,并将第八存储器中的值存储到第九存储器中,第八存储器中存储当前的第一模块和第二模块的状态值。采用这个方法能够有效防止因电容参数不同而产生电压偏差的问题,使获得的模块电压更加准确。

[0017] 进一步,当MMC正常运行时,所述步骤104中两个相邻串联的单电容模块的运行状态或双电容模块中两个模块的运行状态根据每个模块中的开关器件的导通或关断的状态进行判断。

[0018] 进一步,当MMC发生高压直流侧短路故障时,所述步骤104中两个相邻串联的单电容模块的运行状态或双电容模块中两个模块的运行状态根据每个模块拓扑和经过该模块的电流方向进行设定。

[0019] 进一步,所述获得电流方向的方法为:取最近两次获得的模块的电容电压值,用最后一次获得的模块电容电压值减去倒数第二次获得的电容电压值,根据获得结果的正负值判断经过该模块的电流方向,如果为正则电流正向流入,如果为负则电流反向流入。

[0020] 进一步,所述获得电流方向的方法为:将各桥臂电流测量电路得到的电流值,经由MMC主控制器发送给模块控制器进行电流的方向的判断。

[0021] 进一步,所述采集点处的电压 $u_m$ 的采集频率不小于测量的模块等效开关频率最高值的两倍。

[0022] 进一步,所述模块电压最大门限值 $u_{cimmaxref}$ 为1.2倍的单个电容电压额定值;最小判断门限值 $u_{min}$ 为0.8倍的的单个电容电压额定值。

[0023] 本发明还提供了一种基于状态监测的MMC模块电压测量方法的故障定位方法,包括以下步骤:

[0024] 步骤201:模块故障定位初始化,在MMC系统中选择多个计数器用于记录检测到开路故障的次数,并给每个计数器赋初值;

[0025] 步骤202:电压传感器或电压采样电路开始测量采样点电压 $u_m$ 。

[0026] 步骤203:同时进行短路故障和开路故障的判断,其中短路故障判断通过检测每个模块是否存在IGBT短路保护信号 $s(i)$ , $i=1,2$ , $i$ 表示模块的编号;如果有 $s(i)$ 信号,则模块 $i$ 发生短路故障;开路故障结合采样点处的电压值 $u_m$ 和每个模块的运行状态进行判断;

[0027] 步骤204:判断控制是否结束,如果MMC系统的主控制器没有发出控制结束指令则根据系统控制信号,继续循环进行步骤202~203进行故障的检测和定位;如果MMC系统的主控制器发出控制结束指令,则结束控制。

[0028] 进一步,所述步骤203中开路故障的判断条件为:

[0029] 当 $F1=0$ 且 $F2=0$ 时,如果 $u_m \leq u_{min}$ ,继续进行检测,如果 $u_m > u_{min}$ ,说明模块1或模块 2

中至少存在一个开路故障,继续分别比较每个模块中的电容电压与每个模块的最大门限的大小,如果每个模块中的电容电压 $u_{ci}$ 均小于对应模块的最大门限 $u_{cimaxref}$ ,则继续进行检测,如果第 $i$ 个模块中的电容电压 $u_{ci}$ 大于对应模块的最大门限 $u_{cimaxref}$ ,则连续检测三次,如果三次检测的结果均是第 $i$ 个模块中的电容电压 $u_{ci}$ 大于对应模块的最大门限 $u_{cimaxref}$ ,则模块 $i$ 存在开路故障;

[0030] 当 $F1=1$ 且 $F2=0$ 时,如果 $u_m \geq u_{min}$ ,判断 $u_m$ 是否大于 $2u_{min}$ ,如果 $u_m \leq 2u_{min}$ ,则继续检测,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 均大于 $2u_{min}$ ,则模块2存在开路故障,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 没有均大于 $2u_{min}$ ,则继续检测;如果 $u_m < u_{min}$ ,连续采样采样点处的电压 $u_m$ ,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 均小于 $u_{min}$ ,则模块1存在开路故障,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 没有均小于 $u_{min}$ ,则继续检测;

[0031] 当 $F1=0$ 且 $F2=1$ 时,如果 $u_m \geq u_{min}$ ,判断 $u_m$ 是否大于 $2u_{min}$ ,如果 $u_m \leq 2u_{min}$ ,则继续检测,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 均大于 $2u_{min}$ ,则模块1存在开路故障,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 没有均大于 $2u_{min}$ ,则继续检测;如果 $u_m < u_{min}$ ,连续采样采样点处的电压 $u_m$ ,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 均小于 $u_{min}$ ,则模块2存在开路故障,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 没有均小于 $u_{min}$ ,则继续检测;

[0032] 当 $F1=1$ 且 $F2=1$ 时,如果 $u_m \geq 2u_{min}$ ,继续进行检测,如果 $u_m < 2u_{min}$ ,说明模块1或模块2中至少存在一个开路故障,继续分别比较每个模块中的电容电压与每个模块的最大门限的大小,如果每个模块中的电容电压 $u_{ci}$ 均小于对应模块的最大门限 $u_{cimaxref}$ ,则继续进行检测,如果第 $i$ 个模块中的电容电压 $u_{ci}$ 大于对应模块的最大门限 $u_{cimaxref}$ ,则连续检测三次,如果三次检测的结果均是第 $i$ 个模块中的电容电压 $u_{ci}$ 大于对应模块的最大门限 $u_{cimaxref}$ ,则模块 $i$ 存在开路故障。

[0033] 有益效果:与现有技术相比,本发明具有以下优点:

[0034] 第一,本发明提供的方法中采用的电压采集点与以往不同,本发明选择在两个相邻串联的单电容模块或双电容模块的输出端口,一个电压传感器或电压测量电路可以测量两个电容电压,大幅节省了电压传感器或电压测量电路的数量,降低了硬件成本和复杂度,提高了系统可靠性,在两个模块同时输出正电压时依然能测量出两个模块各自的电压值,且能提供电压校正,避免因电容值等参数不同的原因造成的电压误差。

[0035] 第二,本发明提供的方法可以根据测得的两个模块的电压值或双电容模块的两个电容电压值和模块开关器件的工作状态判断出该模块是否出现开路故障,并可根据故障模块发出的故障报警信号和该模块的编号定位该模块的位置。因为该方法是根据模块不同运行状态的情况下就进行故障判断,且此时的判断依据较为明确,所以可在故障发生后的较短时间内发现故障,特别是在两个模块单独输出正电压时能直接判断所测模块是哪一个存在开路故障。

[0036] 第三,本发明提供的方法选择在模块的控制器中实现,有利于该方法实现的快速和准确性,降低了系统硬件复杂度的同时没用增加系统控制的难度。

[0037] 第四,本发明提供的方法适合应用于现在所有的MMC的调制策略和控制策略。

[0038] 第五,本发明提供的方法在MMC发生直流短路故障需封锁所有开关器件的驱动信号和某一模块发生故障需封锁该模块开关器件的驱动信号时,根据不同的模块拓扑和电流方向来设定 $[F1F2]$ 的值,所述的模块电压测量方法同样可以测得模块电压。



## 附图说明

[0039] 图1为模块化多电平变换器的整体原理框图；

[0040] 图2为四种含有两个电容的模块拓扑结构,其中(a)表示两个半桥单电容模块串联的电压采集点原理框图,(b)表示双电容模块的电压采集点原理框图,(c)表示不对称交叉型双电容模块的电压采集点原理框图,(d)表示一个半桥单电容模块和一个全桥单电容模块串联的电压采集点原理框图；

[0041] 图3为本发明提供的MMC模块电压测量方法流程图；

[0042] 图4为模块状态[F1F2]确定方法示意图,其中(a)表示正常运行情况下的确定方法示意图,(b)表示驱动信号封锁情况下的确定方法示意图；

[0043] 图5为本发明提供的MMC故障模块判断及定位方法流程图。

## 具体实施方式

[0044] 下面结合附图对本发明做更进一步的解释。

[0045] 实施例：

[0046] 本发明提供的方法适用于MMC中的所有模块输出电压大于等于0的单电容或双电容模块。

[0047] 如图2(b)所示的双电容模块可以在模块正常工作时视为多种双电容模块的简化或等效拓扑,且与如图2(a)所示的两个半桥单电容模块串联拓扑工作原理相同,因此以如图2(b)所示的双电容模块为例。

[0048] 所提出的一种基于状态监测的MMC模块电压测量和故障定位方法的电压采集点选择在如图2(b)所示的双电容模块的输出端口,所述算法在该MMC系统中实现。

[0049] 如图3所示,基于状态监测的MMC模块电压测量方法包含如下步骤：

[0050] 步骤101:将电压传感器或电压采样电路设置在双电容模块的输出端口,此输出端口为采样点;双电容模块中两个模块分别表示为模块1和模块2;

[0051] 步骤102:模块电压测量初始化,设置每个模块电压最大门限值 $U_{cimaxref}$ 为1.2倍的单个电容电压额定值,模块电压的最小判断门限值 $u_{min}$ 为0.8倍的的单个电容电压额定值,电压校正系数 $d$ 的初始值为1/2,并在MMC系统中选择9个存储器存储相应参数;其中,电压校正系数 $d$ 存储到第七存储器中, $M7$ 表示第七存储器中的值。

[0052] 步骤103:电压传感器或电压采样电路开始测量采样点电压 $u_m$ ;电压采样的频率应高于所测模块等效开关频率最高值的两倍以上。

[0053] 步骤104:确定双电容模块中两个模块的运行状态,结合步骤103中获得的采样点电压 $u_m$ 获得每个模块的电容电压值;其中,双电容模块的运行状态用[F1F2]表示, $F1$ 表示模块1的运行状态变量, $F2$ 表示模块2的运行状态变量。

[0054] MMC正常运行时,如图4(a)所示,考虑开关器件的导通或关断时间、电压信号采集和读取的时间延迟,正常运行时模块的运行状态可以用模块中的开关驱动信号来表示,模块1中 $T1$ 和 $T2$ 的开关驱动信号互补, $T1$ 导通时,模块1输出为正电压,经过延迟后 $F1=1$ , $T1$ 关断时,模块1输出为0,经过延迟 $F1=0$ 。同样地,模块2中 $T3$ 和 $T4$ 的开关驱动信号互补, $T3$ 导通时,模块2输出为正电压,经过延迟后 $F2=1$ , $T3$ 关断时,模块2输出为0,经过延迟 $F2=0$ 。

[0055] 如果MMC发生高压直流侧短路故障,此时所有开关器件的驱动信号将被封锁,或者模块开关器件本身发生短路故障,为保护系统将该模块开关器件的驱动信号进行封锁,这种情况下开关器件的驱动信号被封锁模块电压的测量不再判断模块开关器件的工作状态,而是如图4(b)所示,根据不同的模块拓扑类型和经过该模块的电流方向设定[F1 F2]的值,然后根据[F1F2]的值结合模块电压测量方法测得模块电压。其中电流方向信号可以由送至MMC主控制器的各桥臂电流测量电路得到的电流值,经由MMC主控制器发送给模块控制器进行判断电流的方向,也可以根据记录最近两次测得的模块电压判断,用最后一次测得的电压减去倒数第二次测得的电压,如果为正则电流正向流入,如果为负则电流反向流入。如图2(a)所示的两个半桥单电容模块的串联拓扑,模块1和模块2的开关器件驱动信号都被封锁后的[F1F2]的值在电流正向流入该拓扑时设定为[11],电流反向流入时设定为[00],假设该拓扑中只有模块1的开关器件驱动信号被封锁,而模块2正常工作,则[F1F2]的值在电流正向流入该拓扑时设定为[1F2],电流反向流入时设定为[0F2],其中F2表示模块2的运行状态;如图2(b)所示的双电容模块的拓扑结构,所有开关器件的驱动信号被封锁后的[F1F2]的值在电流正向流入时设定为[11],反向流入时设定为[00];如图2(c)所示的不对称交叉型双电容模块的拓扑结构,所有开关器件的驱动信号被封锁后的[F1F2]的值不管电流方向怎样都被设定为[11];如图2(d)所示的一个半桥单电容模块和一个全桥单电容模块串联的拓扑结构,所有开关器件的驱动信号被封锁后的[F1F2]的值在电流正向流入时设定为[11],反向流入时设定为[01]。

[0056] 当[F1F2]=[00]时,模块1中的电容电压 $u_{c1}=M1$ ,M1表示第一存储器中的值,第一存储器用于记录模块1中电容电压的值,模块2中的电容电压 $u_{c2}=M2$ ,M2表示第二存储器中的值,第二存储器用于记录模块2中电容电压的值;第一存储器和第二存储器中的值不更新;同时,将第八存储器中的值存储到第九存储器中,即 $M9=M8$ ,第八存储器中存储当前的第一模块和第二模块的状态值,即 $M8=[F1F2]$ ;其中,第八存储器用于记录一次运行状态变化前第一模块和第二模块的状态值,用M8表示第八存储器中的值;第九存储器用于记录两次运行状态变化前第一模块和第二模块的状态值,用M9表示第九存储器中的值;

[0057] 当[F1F2]=[10]时,判断采样点处的电压 $u_m$ 的范围,如果 $u_m \leq u_{min}$ 或 $u_m \geq 2u_{min}$ ,模块1中的电容电压 $u_{c1}=M1$ ,模块2中的电容电压 $u_{c2}=M2$ ,第一存储器和第二存储器中的值不更新,继续进行检测;如果 $u_{min} < u_m < 2u_{min}$ ,判断是否(( $M8=[11]$ )或( $M9=[11]$ 且 $M8=[01]$ )),如果符合两种情况中的一种,则将此时采样点处的电压 $u_m$ 存储到第五存储器中, M5表示第五存储器中的值,第五存储器用于记录[F1F2]=[11]后第一次变为[F1F2]=[1 0]时的模块1中的电容电压;然后判断M8是否等于[01],如果 $M8=[01]$ ,计算校正系数d并更新原来的校正系数存储到第七存储器中, $d=(|M5-M3|)/(|M4-M2|+|M5-M3|)$ ;此时模块1中的电容电压 $u_{c1}$ 为此次采样点处的电压值 $u_m$ ,模块2中的电容电压 $u_{c2}$ 不变;更新第一存储器中的值,并将第八存储器中的值存储到第九存储器中,第八存储器中存储当前的第一模块和第二模块的状态值;

[0058] 当[F1F2]=[01]时,判断采样点处的电压 $u_m$ 的范围,如果 $u_m \leq u_{min}$ 或 $u_m \geq 2u_{min}$ ,模块1中的电容电压 $u_{c1}=M1$ ,模块2中的电容电压 $u_{c2}=M2$ ,第一存储器和第二存储器中的值不更新,继续进行检测;如果 $u_{min} < u_m < 2u_{min}$ ,判断是否(( $M8=[11]$ )或( $M9=[11]$ 且 $M8=[10]$ )),如果符合两种情况中的一种,则将此时采样点处的电压 $u_m$ 存储到第六存储器中,第六

存储器用来记录[F1F2]=[11]后第一次变为[F1F2]=[01]时的模块2中的电容电压, M6表示第六存储器中的值;如果M8=[10], 计算校正系数d并更新原来的校正系数,  $d = (|M5-M3|) / (|M4-M2| + |M5-M3|)$ , 并将更新后的值存储到第七存储器中;此时模块2中的电容电压 $u_{c2}$ 为此次采样点处的电压值 $u_m$ , 模块1中的电容电压 $u_{c1}$ 不变;更新第二存储器中的值, 并将第八存储器中的值存储到第九存储器中, 第八存储器中存储当前的第一模块和第二模块的状态值;

[0059] 当[F1F2]=[11]时, 判断测量电压 $u_m$ 的范围, 如果 $u_m \leq 2u_{min}$ 时, 模块1中的电容电压 $u_{c1} = M1$ , 模块2中的电容电压 $u_{c2} = M2$ , 第一存储器和第二存储器中的值不更新, 继续进行检测;如果 $u_m > 2u_{min}$ , 判断M8是否等于[10]或[01], 如果符合两种情况中的一种, 则将此时第一存储器中的值存储到第三存储器中, 将此时第二存储器中的值存储到第四存储器中, 用M3表示第三存储器中的值, M4表示第四存储器中的值;即 $M3 = M1$ ,  $M4 = M2$ ;并计算模块1的电压变化量 $u_{v1}$ 和模块2的电压变化量 $u_{v2}$ ;如果不符合两种情况, 直接计算模块1的电压变化量 $u_{v1}$ 和模块2的电压变化量 $u_{v2}$ , 其中,  $u_{v1} = (u_m - M1 - M2) \times M7$ ,  $u_{v2} = (u_m - M1 - M2) \times (1 - M7)$ 。此时, 模块1中的电容电压 $u_{c1} = M1 + u_{v1}$ , 模块2中的电容电压 $u_{c2} = M2 + u_{v2}$ ;并更新模块1和模块2的电容电压存储值;更新第一存储器和第二存储器中的值, 并将第八存储器中的值存储到第九存储器中, 第八存储器中存储当前的第一模块和第二模块的状态值。

[0060] 步骤105:判断控制是否结束, 如果MMC系统的主控制器没有发出控制结束指令则根据系统控制信号, 继续循环进行步骤103~步骤104测量模块电压;如果MMC系统的主控制器发出控制结束指令, 则结束控制。

[0061] 如图5所示, 基于状态监测的MMC模块电压测量方法的故障定位方法, 包括以下步骤:

[0062] 步骤201:模块故障定位初始化, 在MMC系统中选择6个计数器用于记录检测到开路故障的次数, 并给每个计数器赋初值0;

[0063] 步骤202:电压传感器或电压采样电路开始测量采样点电压 $u_m$ 。

[0064] 步骤203:同时进行短路故障和开路故障的判断, 其中短路故障判断通过检测每个模块是否存在IGBT短路保护信号 $s(i)$ ,  $i = 1, 2$ ,  $i$ 表示模块的编号;如果有 $s(i)$ 信号, 则模块 $i$ 发生短路故障;开路故障结合采样点处的电压值 $u_m$ 和每个模块的运行状态进行判断;

[0065] 其中, 开路故障的判断条件为:

[0066] 当[F1F2]=[00]时, 如果 $u_m \leq u_{min}$ , 继续进行检测, 如果 $u_m > u_{min}$ , 说明模块1或模块2中至少存在一个开路故障, 继续分别比较每个模块中的电容电压与每个模块的最大门限的大小, 如果每个模块中的电容电压 $u_{ci}$ 均小于对应模块的最大门限 $u_{cimaxref}$ , 则继续进行检测, 如果第 $i$ 个模块中的电容电压 $u_{ci}$ 大于对应模块的最大门限 $u_{cimaxref}$ , 则连续检测三次, 通过计数器进行计次, 如果三次检测的结果均是第 $i$ 个模块中的电容电压 $u_{ci}$ 大于对应模块的最大门限 $u_{cimaxref}$ , 则模块 $i$ 存在开路故障;同时计数器清零。

[0067] 当[F1F2]=[10]时, 如果 $u_m \geq u_{min}$ , 判断 $u_m$ 是否大于 $2u_{min}$ , 如果 $u_m \leq 2u_{min}$ , 则继续检测, 如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 均大于 $2u_{min}$ , 则模块2存在开路故障, 如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 没有均大于 $2u_{min}$ , 则继续检测;如果 $u_m < u_{min}$ , 连续采样采样点处的电压 $u_m$ , 通过计数器进行计次, 如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 均小于 $u_{min}$ , 则模块1存在开路故障, 如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 没有均小于 $u_{min}$ , 则

继续检测;同时计数器清零。

[0068] 当[F1F2]=[01],如果 $u_m \geq u_{min}$ ,判断 $u_m$ 是否大于 $2u_{min}$ ,如果 $u_m \leq 2u_{min}$ ,则继续检测,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 均大于 $2u_{min}$ ,则模块1存在开路故障,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 没有均大于 $2u_{min}$ ,则继续检测;如果 $u_m < u_{min}$ ,连续采样采样点处的电压 $u_m$ ,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 均小于 $u_{min}$ ,则模块2存在开路故障,如果连续三次采样到的采样点处的电压 $u_m$ 没有均小于 $u_{min}$ ,则继续检测;

[0069] 当[F1F2]=[11],如果 $u_m \geq 2u_{min}$ ,继续进行检测,如果 $u_m < 2u_{min}$ ,说明模块1或模块2中至少存在一个开路故障,继续分别比较每个模块中的电容电压与每个模块的最大门限的大小,如果每个模块中的电容电压 $u_{ci}$ 均小于对应模块的最大门限 $u_{cimaxref}$ ,则继续进行检测,如果第 $i$ 个模块中的电容电压 $u_{ci}$ 大于对应模块的最大门限 $u_{cimaxref}$ ,则连续检测三次,如果三次检测的结果均是第 $i$ 个模块中的电容电压 $u_{ci}$ 大于对应模块的最大门限 $u_{cimaxref}$ ,则模块 $i$ 存在开路故障。

[0070] 步骤204:判断控制是否结束,如果MMC系统的主控制器没有发出控制结束指令则根据系统控制信号,继续循环进行步骤202进行故障的检测和定位;如果MMC系统的主控制器发出控制结束指令,则结束控制。

[0071] 基于状态监测的MMC模块电压测量方法和故障定位方法可以同时进行。

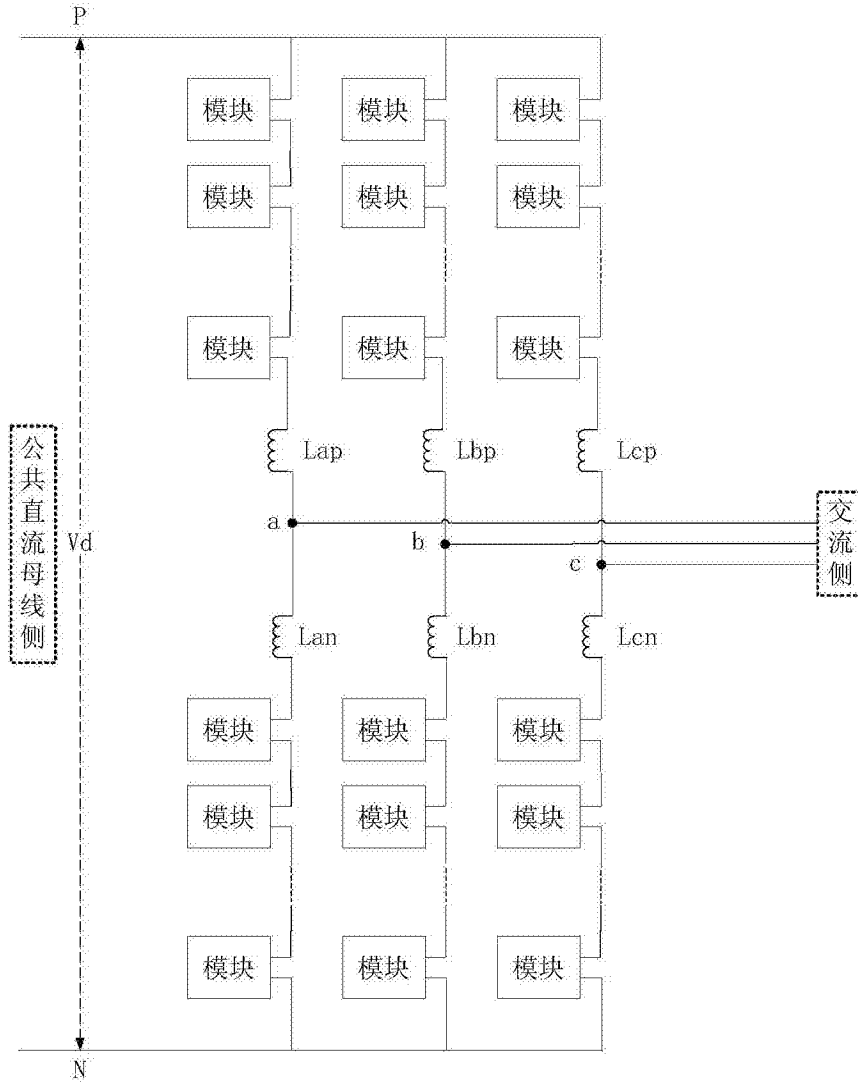
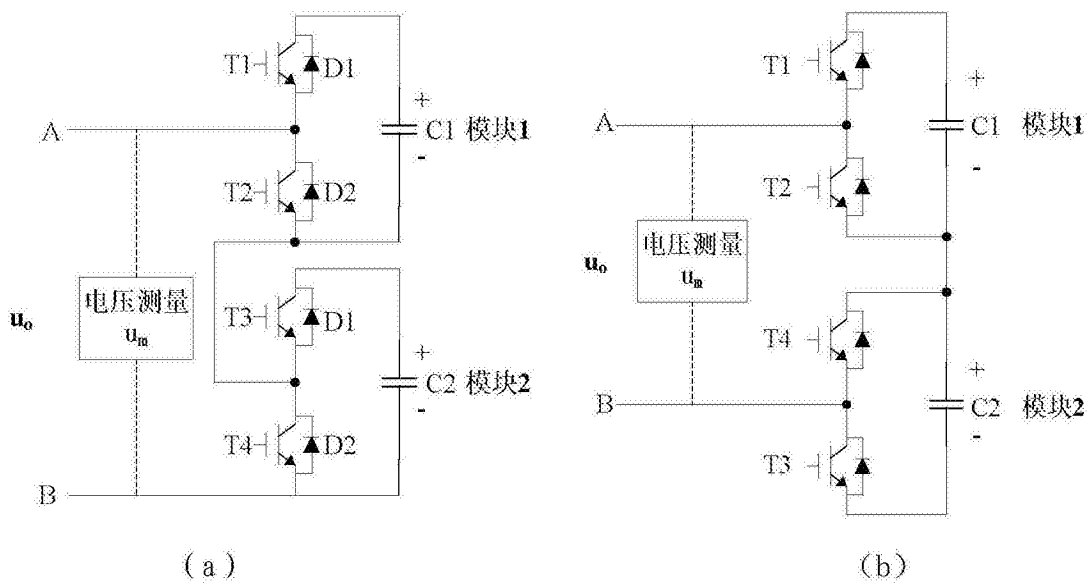


图1



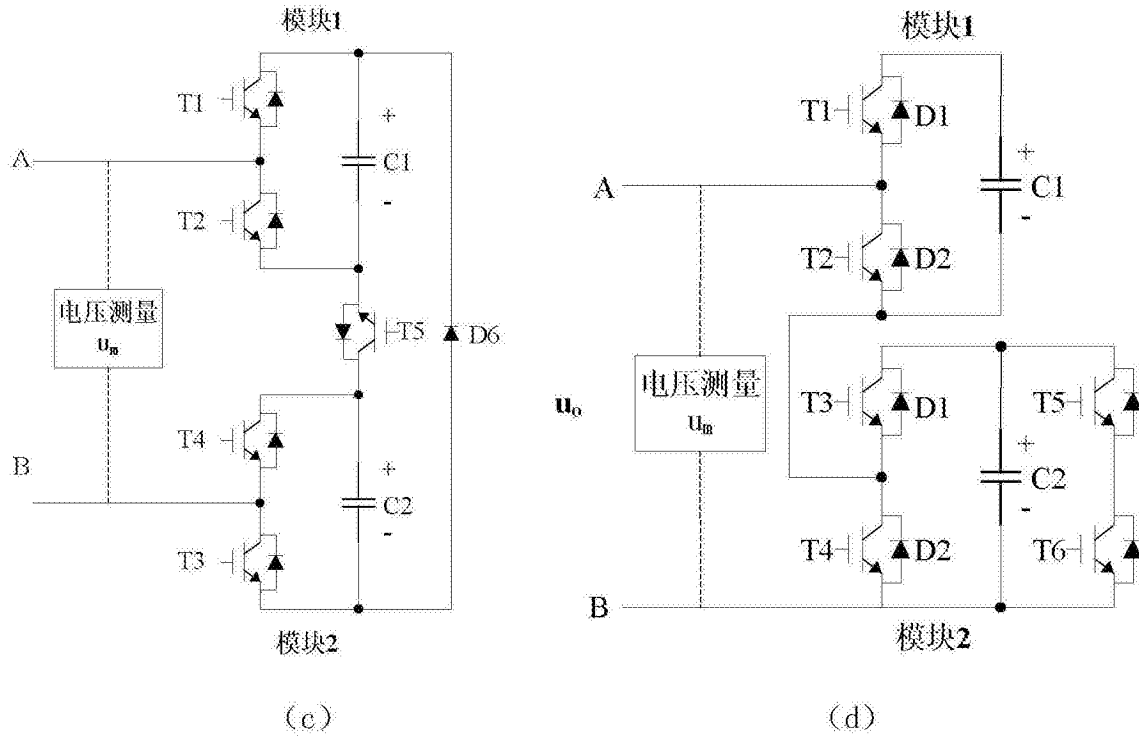


图2

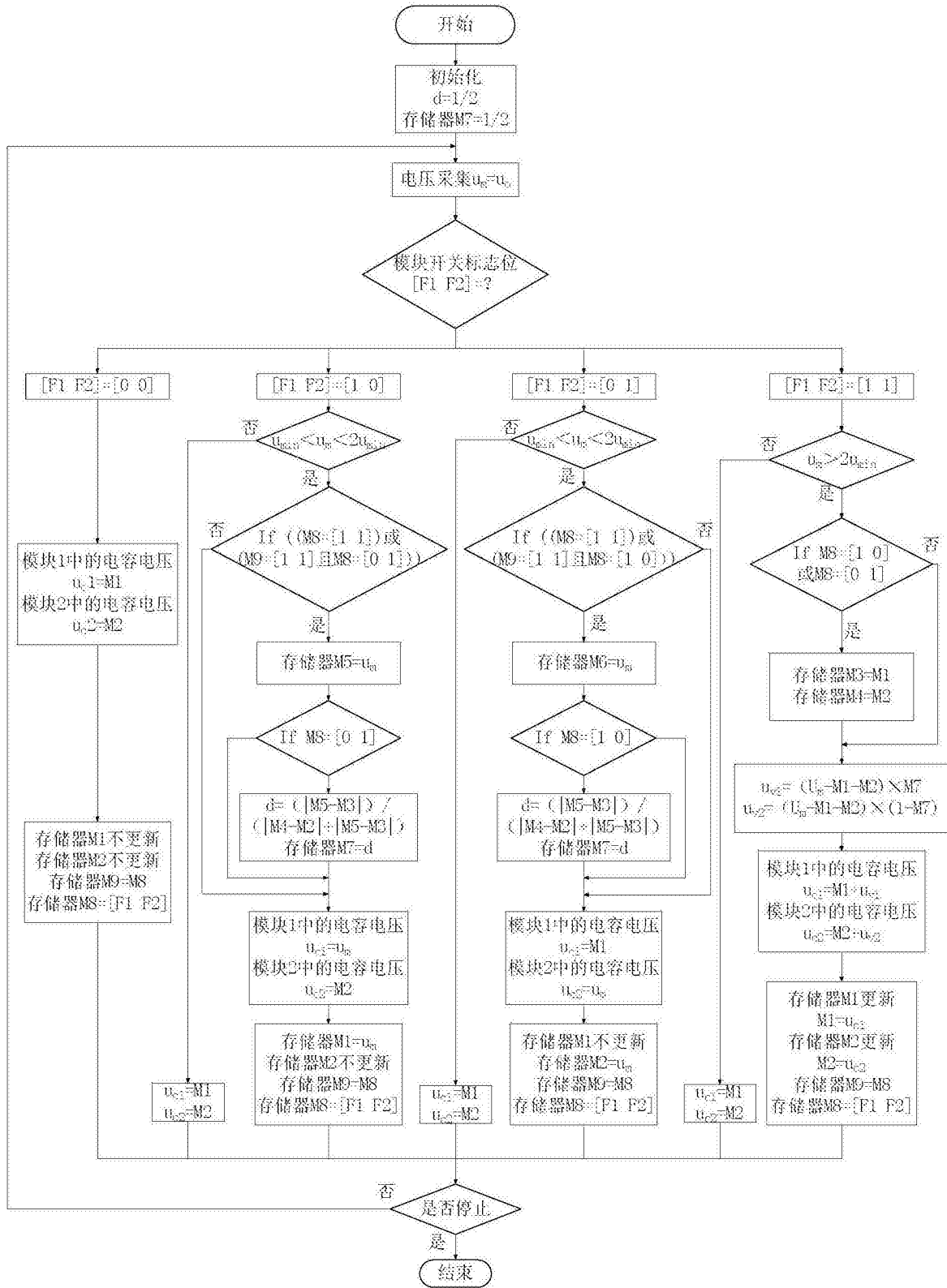
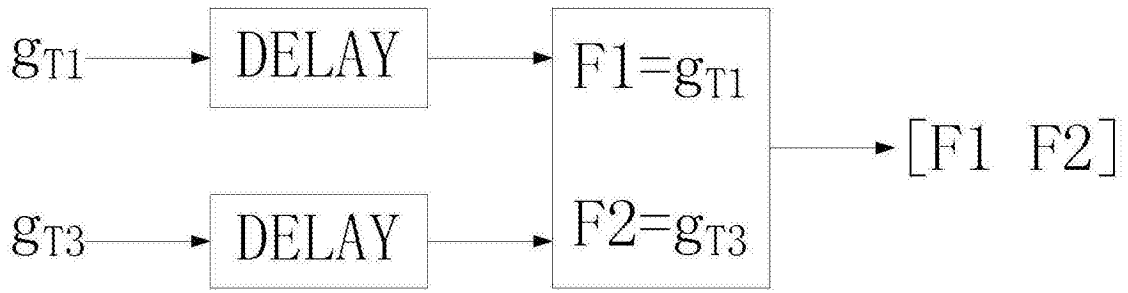
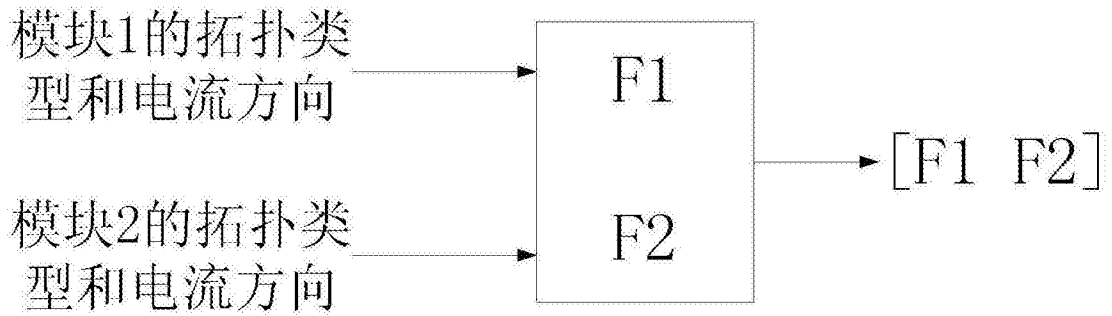


图3



(a)



(b)

图4



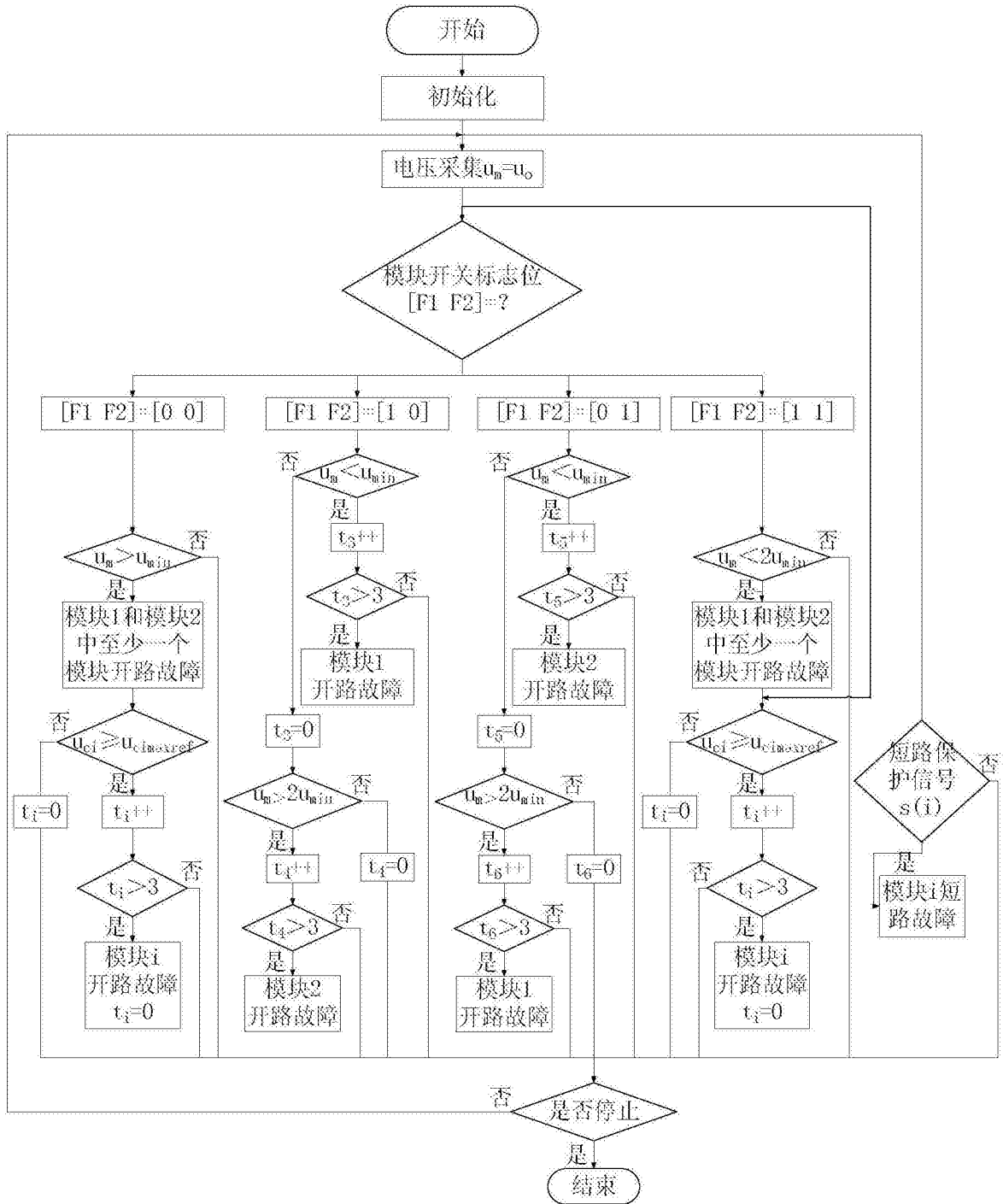


图5