



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 105785976 A

(43)申请公布日 2016.07.20

(21)申请号 201610280711.8

(22)申请日 2016.04.28

(71)申请人 中国南方电网有限责任公司电网技术研究中心

地址 510623 广东省广州市天河区珠江新城华穗路6号四层、五层505-508号房

申请人 南方电网科学研究院有限责任公司

(72)发明人 郭琦 林雪华 朱益华 郭海平 黄立滨

(74)专利代理机构 北京中博世达专利商标代理有限公司 11274

代理人 申健

(51)Int.Cl.

G05B 23/02(2006.01)

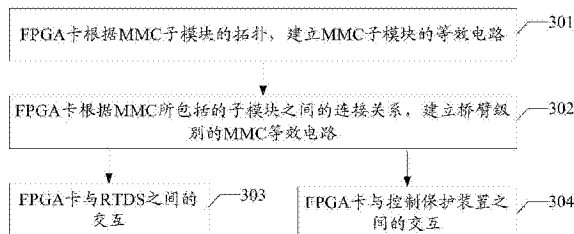
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54)发明名称

一种柔性直流输电中控制保护装置的测试方法及系统

(57)摘要

本发明公开一种柔性直流输电中控制保护装置的测试方法及系统,涉及直流输电领域,能够针对不同MMC子模块的拓扑分别完成测试,为各种子模块级别的特性研究、故障分析等工作提供更具参考价值的测试结果。具体方案为:FPGA卡根据MMC子模块的拓扑,建立MMC子模块的等效电路,并进一步建立MMC的等效电路;RTDS根据与控制保护装置所交互的模拟量和数字量生成桥臂电流值,并将桥臂电流值发送至FPGA卡;FPGA卡根据桥臂电流值计算得到MMC各个子模块的电容电压,并将电容电压反馈至控制保护装置,以便控制保护装置调整控制策略,更新与RTDS所交互的模拟量和数字量。本发明用于柔性直流输电中控制保护装置的测试。



1. 一种柔性直流输电中控制保护装置的测试方法,其特征在于,  
现场可编程门阵列FPGA卡根据模块化多电平换流器MMC子模块的拓扑,建立MMC子模块的等效电路;

FPGA卡根据MMC内子模块之间的连接关系,建立MMC的等效电路;

实时数字仿真器RTDS根据与控制保护装置所交互的模拟量和数字量生成桥臂电流值,并将桥臂电流值发送至FPGA卡;

FPGA卡根据桥臂电流值计算得到MMC各个子模块的电容电压,并将电容电压反馈至控制保护装置,以便控制保护装置调整控制策略,更新与RTDS所交互的模拟量和数字量。

2. 根据权利要求1所述的测试方法,其特征在于,所述测试方法还包括:

FPGA卡根据MMC的等效电路以及桥臂电流值,计算得到桥臂等效电压和桥臂等效电阻,并将桥臂等效电压和桥臂等效电阻发送至RTDS。

3. 根据权利要求1所述的测试方法,其特征在于,

所述测试方法还包括:控制保护装置向FPGA卡发送MMC子模块开关的触发脉冲;

所述FPGA卡根据桥臂电流值计算得到MMC各个子模块的电容电压,具体包括:FPGA卡根据触发脉冲确定MMC子模块的工作状态,并根据桥臂电流值以及MMC子模块的工作状态计算得到MMC各个子模块的电容电压。

4. 根据权利要求1所述的测试方法,其特征在于,所述FPGA卡根据模块化多电平换流器MMC子模块的拓扑,建立MMC子模块的等效电路,包括:

建立MMC子模块中电容器的诺顿等效电路;

根据MMC子模块中绝缘栅双极型晶体管IGBT的工作状态,将IGBT和反并联的二极管等效为模拟导通和关断的可变电阻;

根据MMC子模块电容器、IGBT以及反并联的二极管的连接关系,建立MMC子模块的戴维南等效电路。

5. 根据权利要求4所述的测试方法,其特征在于,

MMC的MMC等效电路中,每个桥臂的等效电路由N个MMC子模块的戴维南等效电路以及桥臂电抗串联组成;其中N为大于1的整数。

6. 一种柔性直流输电中控制保护装置的测试系统,其特征在于,包括:连接构成闭环的实时数字仿真器RTDS、RTDS提供的千兆级传输现场可编程门阵列GTFPGA板卡、FPGA卡、模块化多电平换流器MMC柔性直流中的控制保护装置以及RTDS提供的IO板卡;

其中,所述控制保护装置通过所述IO板卡与RTDS连接;RTDS通过GTFPGA板卡与FPGA卡连接;FPGA卡还与控制保护装置连接;

FPGA卡,用于根据模块化多电平换流器MMC子模块的拓扑,建立MMC子模块的等效电路;根据MMC内子模块之间的连接关系,建立MMC的等效电路;

RTDS,用于通过IO板卡与控制保护装置交互模拟量和数字量,根据模拟量和数字量生成桥臂电流值,并将桥臂电流值通过GTFPGA板卡发送至FPGA卡;

FPGA卡,还用于根据桥臂电流值计算得到MMC各个子模块的电容电压,并将电容电压反馈至控制保护装置,以便控制保护装置调整控制策略,更新与RTDS所交互的模拟量和数字量。

7. 根据权利要求6所述的测试系统,其特征在于,RTDS包括:

大步长环境中搭建的交直流电网仿真模型、小步长环境中搭建的MMC换流器等效模型以及大小步长接口变压器；

所述交直流电网仿真模型与所述MMC换流器等效模型通过所述大小步长接口变压器连接；

所述交直流电网仿真模型与IO板卡通过光纤连接；

所述MMC换流器等效模型与GTFPGA板卡通过光纤连接。

8. 根据权利要求7所述的测试系统,其特征在於,

IO板卡与控制保护装置通过电缆连接；

控制保护装置与FPGA卡之间,以及FPGA卡与GTFPGA板卡之间通过光纤连接,基于Aurora协议完成通信。

9. 根据权利要求6所述的测试系统,其特征在於,

所述FPGA卡,还用于根据MMC的等效电路以及桥臂电流值,计算得到桥臂等效电压和桥臂等效电阻,并将桥臂等效电压和桥臂等效电阻发送至RTDS。

10. 根据权利要求6所述的测试系统,其特征在於,

所述控制保护装置,还用于向FPGA卡发送MMC子模块开关的触发脉冲；

所述FPGA卡,具体用于根据触发脉冲确定MMC子模块的工作状态,并根据桥臂电流值以及MMC子模块的工作状态计算得到MMC各个子模块的电容电压。

## 一种柔性直流输电中控制保护装置的测试方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及直流输电领域,尤其涉及一种柔性直流输电中控制保护装置的测试方法及系统。

### 背景技术

[0002] 柔性直流输电与常规直流输电相比控制更灵活,它能实现功率的四象限控制,适用于新能源接入电网以及向无源网络供电等场合,特别是基于模块化多电平换流器(英文全称:Modular Multilevel Converter,英文简称:MMC)的柔性直流输电以其拓扑灵活、输出电压谐波小、不需要额外滤波器、换流站占地面积小等优点而得到广泛应用。

[0003] 为测试柔性直流输电系统中控制保护装置的功能,需要将控制保护装置与柔性直流实时仿真模型连接构成闭环试验测试系统。由于MMC子模块化且拓扑灵活多变的特点,工程实践中可以根据实际需求采用不同拓扑结构的MMC子模块,因此实际情况下MMC子模块的拓扑结构往往多变,而现有的实时仿真测试软件,以实时数字仿真器(英文全称:Real Time Digital Simulator,英文简称:RTDS)为例,为提高仿真效率,往往仿真模型的封装度较高,对多种实际的MMC子模块拓扑均采用相同仿真模型,不能反映子模块拓扑的各种变化对测试结果的影响,不能对子模块级别的特性研究提供参考。

### 发明内容

[0004] 本申请提供一种柔性直流输电中控制保护装置的测试方法及系统,能够针对不同MMC子模块的拓扑分别完成测试,为各种子模块级别的特性研究、故障分析等工作提供更具参考价值的测试结果。

[0005] 为达到上述目的,本申请采用如下技术方案:

[0006] 一方面,提供一种柔性直流输电中控制保护装置的测试方法,包括:

[0007] FPGA卡根据MMC子模块的拓扑,建立MMC子模块的等效电路;根据MMC内子模块之间的连接关系,建立MMC的等效电路;

[0008] RTDS根据与控制保护装置所交互的模拟量和数字量生成桥臂电流值,并将桥臂电流值发送至FPGA卡;

[0009] FPGA卡根据桥臂电流值计算得到MMC各个子模块的电容电压,并将电容电压反馈至控制保护装置,以便控制保护装置调整控制策略,更新与RTDS所交互的模拟量和数字量。

[0010] 另一方面,提供一种柔性直流输电中控制保护装置的测试系统,用于完成第一方面所提供的测试方法。

[0011] 本发明的实施例所提供的柔性直流输电中控制保护装置的测试方法及系统,在测试系统中加入一个FPGA卡,FPGA卡通过对MMC子模块的拓扑进行等效,建立MMC的等效电路。RTDS通过与控制保护装置所交互的模拟量和数字量生成桥臂电流值,将桥臂电流值发给FPGA卡,FPGA卡基于MMC的等效电路,根据桥臂电流值计算得到MMC各个子模块的电容电压,并将电容电压反馈至控制保护装置,以便控制保护装置调整控制策略,更新与RTDS所交互

的模拟量和数字量,从而构成闭环的测试系统。随着MMC子模块拓扑结构的不同,FPGA卡所建立的MMC等效电路对应变化,输出的测试结果对应变化。相比现有技术中仅通过几种典型的模型来模拟MMC的情形,通过在测试系统中加入FPGA卡针对不同MMC子模块拓扑计算得到对应的测试结果,反映出子模块拓扑变化对测试结果所带来的变化,从而为各种子模块级别的特性研究、故障分析等工作提供更具参考价值的测试结果。

### 附图说明

[0012] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0013] 图1为现有的控制保护装置的测试系统示意图;

[0014] 图2为本发明所提供的控制保护装置的测试系统示意图;

[0015] 图3为本发明的实施例所提供的一种柔性直流输电中控制保护装置的测试方法流程示意图;

[0016] 图4为MMC的一端的拓扑结构示意图;

[0017] 图5为半桥型子模块的拓扑结构示意图;

[0018] 图6为半桥型子模块的等效电路图;

[0019] 图7为由等效电阻和等效电压源构成的半桥型子模块的戴维南等效电路图;

[0020] 图8为由三相桥臂构成的MMC的等效电路图;

[0021] 图9为本发明的实施例所提供的柔性直流输电中控制保护装置的测试系统结构示意图。

### 具体实施方式

[0022] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0023] 为测试柔性直流输电系统中控制保护装置的功能,需要将控制保护装置与柔性直流实时仿真模型连接构成闭环试验测试系统。以RTDS为例,结合图1所示的现有的测试系统,RTDS101与控制保护装置102连接成闭合回路(中间连接设备为画出),控制保护装置102根据不同控制策略与RTDS101交互各种模拟量和数字量,RTDS101根据内部搭建的仿真模型向控制保护装置102反馈仿真结果,控制保护装置102根据仿真结果调整控制策略。

[0024] 本发明的目的在于提供一种简单易行的测试方案,结合图2所示,在现有测试系统基础上,增加一个FPGA卡103,FPGA卡103用于生成对自定义MMC子模块拓扑的等效电路,针对不同MMC子模块的拓扑分别进行测试,而不是将各种灵活多变的MMC子模块拓扑均通过RTDS提供的几种典型的模型来模拟,从而对各种子模块级别的特性研究、故障分析等工作提供更有参考价值的测试结果。

[0025] 本发明的实施例将结合半桥型MMC子模块拓扑,对本发明的测试方法做示例性说

明。本领域技术人员应当明白,将本发明的实施例中所描述的测试方法,应用于各种不同的MMC子模块的拓扑,实现针对各种自定义的子模块拓扑的测试。

[0026] 实施例

[0027] 本发明的实施例提供一种柔性直流输电中控制保护装置的测试方法,结合图3所示,包括以下步骤:

[0028] 301、FPGA卡根据MMC子模块的拓扑,建立MMC子模块的等效电路。

[0029] MMC一端的拓扑如图4所示,A、B、C三相电流各自对应其上、下桥臂,一个桥臂40由N个子模块401和桥臂电抗402串联组成,其中N为大于1的整数。

[0030] 半桥型子模块的拓扑结构如附图5所示,通常包括上下两个绝缘栅双极型晶体管(英文全称:Insulated Gate Bipolar Transistor,英文简称:IGBT),(图5中分别用IGBT<sub>1</sub>和IGBT<sub>2</sub>表示),与IGBT反并联的二极管D(图5中分别用D<sub>1</sub>和D<sub>2</sub>表示),以及一个电容器C。

[0031] 子模块的正负输入端口之间的电压用U<sub>sm</sub>表示,流入正端口的电流用i<sub>b</sub>表示,流经电容的电流用i<sub>c</sub>表示。

[0032] 建立MMC子模块的等效电路的过程可以划分为以下几个步骤。需要强调的是,以下几个步骤的划分仅仅是为了便于说明,实际应用过程中可以有多种具体的实现方式或者顺序。

[0033] 301-1、建立MMC子模块中电容器的诺顿等效电路。

[0034] 可将电容采用梯形差分的方法,将其等效成一个由等效电容电阻R<sub>c</sub>以及等效电流源i<sub>cs</sub>的诺顿等效电路。

[0035] 电容两端电压u<sub>c</sub>(t)与流过电容的电流i<sub>c</sub>(t)有如下关系:

$$[0036] \quad u_{c(t)} = u_{c(t-\Delta t)} + \frac{1}{c} \int_{t-\Delta t}^t i_{c(t)} dt \quad (1-1)$$

[0037] 在每个步长Δt时间内,将电流对时间的积分转化为梯形的面积,则由(1-1)式可得:

$$[0038] \quad i_{c(t)} = \frac{2c}{\Delta t} u_{c(t)} - \left[ \frac{2c}{\Delta t} u_{c(t-\Delta t)} + i_{c(t-\Delta t)} \right] \quad (1-2)$$

$$[0039] \quad \text{令 } R_c = \frac{\Delta t}{2c} \quad (1-3)$$

$$[0040] \quad \text{得到 } I_{cs(t-\Delta t)} = \frac{u_{c(t-\Delta t)} + i_{c,t-\Delta t}}{R_c} \quad (1-4)$$

[0041] 将(1-3)、(1-4)式带入(1-2)式可得:

$$[0042] \quad i_{c(t)} = \frac{u_{c(t)}}{R_c} - I_{cs(t-\Delta t)} \quad (1-5)$$

[0043] 301-2、根据MMC子模块中IGBT的工作状态,将IGBT和反并联的二极管等效为模拟导通和关断的可变电阻。

[0044] 不管子模块的拓扑结构如何,都可以根据IGBT的导通、关断情况,将对应的IGBT(IGBT<sub>1</sub>或IGBT<sub>2</sub>)及其反并联的二极管D等效成模拟导通和关断的可变电阻R<sub>i1</sub>和R<sub>i2</sub>。采用等效后的电容和IGBT及反并二极管D等元件后,MMC换流器的子模块等效电路如附图6所示,其中R<sub>qc</sub>表示电容器的诺顿等效电路中的等效电阻,I<sub>cs</sub>表示等效电流源电流,U<sub>c</sub>表示电容器

两端的电压。

[0045] 301-3、根据MMC子模块电容器、IGBT以及反并联的二极管的连接关系,建立MMC子模块的戴维南等效电路。

[0046] 为了简化等效算法,再对图6所示的等效电路进一步简化,等效得到由子模块等效电阻和等效电压源构成的子模块戴维南等效电路,如附图7所示。其中等效子模块端口的电压 $U_{sm}$ 以及流入端口的电流 $i_b$ 的计算关系如式(1-6)。

$$[0047] \quad U_{sm}(t) = i_b(t)R_q + U_q(t-\Delta t) \quad (1-6)$$

$$[0048] \quad \text{其中, } U_{q(t-\Delta t)} = I_{csi} \frac{R_c R_{i2}}{R_{i1} + R_{i2} + R_c} \quad (1-7)$$

$$[0049] \quad R_q = \frac{(R_{i1} + R_c)R_{i2}}{R_{i1} + R_{i2} + R_c} \quad (1-8)$$

[0050] 此外,在子模块的等效模型算法中,可以通过自定义故障信号,实现子模块级的故障仿真,如IGBT故障和电容故障等。

[0051] 302、FPGA卡根据MMC内子模块之间的连接关系,建立MMC的等效电路。

[0052] 结合图4所示,一个桥臂由N个子模块和桥臂电抗串联组成。根据MMC子模块的戴维南等效电路的端口电压和电流关系式,对于由N个子模块串联的MMC换流器桥臂,每个桥臂的等效电路由N个MMC子模块的戴维南等效电路以及桥臂电抗串联组成。

[0053] 桥臂等效电阻 $R_{qsum}$ 以及桥臂等效电压源 $U_{qsum}$ 由式(1-9)和(1-10)表示:

$$[0054] \quad R_{qsum} = \sum_{i=1}^n R_{qi} \quad (1-9)$$

$$[0055] \quad U_{qsum} = \sum_{i=1}^n U_{qi}(t-\Delta t) \quad (1-10)$$

[0056] 因此,可以得到如图8所示由三相桥臂构成的MMC的等效电路,其中每个桥臂由桥臂等效电阻、桥臂等效电压源以及桥臂电抗串联组成。

[0057] 通过步骤301和302,FPGA卡得到基于自定义的MMC子模块拓扑的MMC等效电路,进一步可以通过与RTDS以及控制保护装置的交互,基于当前得到的MMC子模块拓扑对控制保护装置完成测试。以下通过步骤303和304对FPGA卡与RTDS之间的交互以及与控制保护装置之间的交互分别做说明,步骤303和304没有先后顺序。

[0058] 303、与RTDS之间的交互。

[0059] FPGA卡接收RTDS发送的桥臂电流值,其中桥臂电流值为RTDS根据与控制保护装置所交互的模拟量和数字量生成,RTDS可以通过与控制保护装置之间的连接与控制保护装置进行数据交互。

[0060] FPGA卡根据MMC的等效电路以及桥臂电流值,计算得到桥臂等效电压和桥臂等效电阻,并向RTDS发送桥臂等效电压和桥臂等效电阻。FPGA卡可以与RTDS提供的GTFPGA板卡通过光纤连接,并基于Aurora协议完成数据交互。

[0061] 304、与控制保护装置之间的交互。

[0062] FPGA卡接收控制保护装置中的阀控装置发出的一系列MMC子模块开关的触发脉冲,根据触发脉冲和桥臂电流值计算得到MMC各个子模块的电容电压,并向控制保护装置发送计算得到的电容电压。FPGA卡可以与控制保护装置通过光纤连接,并基于Aurora协议完

成数据交互。

[0063] 本发明的实施例所提供的柔性直流输电中控制保护装置的测试方法,在测试系统中加入一个FPGA卡,FPGA卡通过对MMC子模块的拓扑进行等效,建立MMC的等效电路。RTDS通过与控制保护装置所交互的模拟量和数字量生成桥臂电流值,将桥臂电流值发给FPGA卡,FPGA卡基于MMC的等效电路,根据桥臂电流值计算得到MMC各个子模块的电容电压,并将电容电压反馈至控制保护装置,以便控制保护装置调整控制策略,更新与RTDS所交互的模拟量和数字量,从而构成闭环的测试系统。随着MMC子模块拓扑结构的不同,FPGA卡所建立的MMC等效电路对应变化,输出的测试结果对应变化。相比现有技术中仅通过几种典型的模型来模拟MMC的情形,通过在测试系统中加入FPGA卡针对不同MMC子模块拓扑计算得到对应的测试结果,反映出子模块拓扑变化对测试结果所带来的变化,从而为各种子模块级别的特性研究、故障分析等工作提供更具参考价值的测试结果。

[0064] 本发明的实施例还提供一种柔性直流输电中控制保护装置的测试系统,用于执行上述实施例中所描述的测试方法,参照图9所示,测试系统90包括:连接构成闭环的RTDS901、RTDS901提供的GTFPGA板卡902、FPGA卡903、MMC柔性直流中的控制保护装置904以及RTDS901提供的IO板卡905。

[0065] 其中,控制保护装置904通过IO板卡905与RTDS901连接。RTDS901通过GTFPGA板卡902与FPGA卡903连接。FPGA卡903还与控制保护装置904连接。

[0066] FPGA卡903,用于根据模块化多电平换流器MMC子模块的拓扑,建立MMC子模块的等效电路。根据MMC内子模块之间的连接关系,建立MMC的等效电路。

[0067] RTDS901,用于通过IO板卡905与控制保护装置904交互模拟量和数字量,根据模拟量和数字量生成桥臂电流值,并将桥臂电流值通过GTFPGA板卡902发送至FPGA卡903。

[0068] FPGA卡903,还用于根据桥臂电流值计算得到MMC各个子模块的电容电压,并将电容电压反馈至控制保护装置904,以便控制保护装置904调整控制策略,更新与RTDS所交互的模拟量和数字量。

[0069] 在一种具体的实施方式中,RTDS901包括:大步长环境中搭建的交直流电网仿真模型901-1以及小步长环境中搭建的MMC换流器等效模型901-2以及大小步长接口变压器901-3。

[0070] 其中,交直流电网仿真模型901-1与MMC换流器等效模型901-2通过大小步长接口变压器901-3连接。交直流电网仿真模型901-1与IO板卡905通过光纤连接。MMC换流器等效模型901-2与GTFPGA板卡902通过光纤连接。

[0071] 可选的,IO板卡905与控制保护装置904通过电缆连接。控制保护装置904与FPGA卡903之间,以及FPGA卡903与GTFPGA板卡902之间通过光纤连接,基于Aurora协议完成通信。

[0072] FPGA卡903除了用于向控制保护装置904反馈电容电压,还用于根据MMC的等效电路以及桥臂电流值,计算得到桥臂等效电压和桥臂等效电阻,并将桥臂等效电压和桥臂等效电阻发送至RTDS901。

[0073] 具体的,控制保护装置904,向FPGA卡903发送MMC子模块开关的触发脉冲。FPGA卡903根据触发脉冲确定MMC子模块的工作状态,并根据桥臂电流值以及MMC子模块的工作状态计算得到MMC各个子模块的电容电压。

[0074] 本发明的实施例所提供的柔性直流输电中控制保护装置的测试系统,在测试系统



中加入一个FPGA卡,FPGA卡通过对MMC子模块的拓扑进行等效,建立MMC的等效电路。RTDS通过与控制保护装置所交互的模拟量和数字量生成桥臂电流值,将桥臂电流值发给FPGA卡,FPGA卡基于MMC的等效电路,根据桥臂电流值计算得到MMC各个子模块的电容电压,并将电容电压反馈至控制保护装置,以便控制保护装置调整控制策略,更新与RTDS所交互的模拟量和数字量,从而构成闭环的测试系统。随着MMC子模块拓扑结构的不同,FPGA卡所建立的MMC等效电路对应变化,输出的测试结果对应变化。相比现有技术中仅通过几种典型的模型来模拟MMC的情形,通过在测试系统中加入FPGA卡针对不同MMC子模块拓扑计算得到对应的测试结果,反映出子模块拓扑变化对测试结果所带来的变化,从而为各种子模块级别的特性研究、故障分析等工作提供更具参考价值的测试结果。

[0075] 以上,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。本发明的保护范围应以权利要求的保护范围为准。

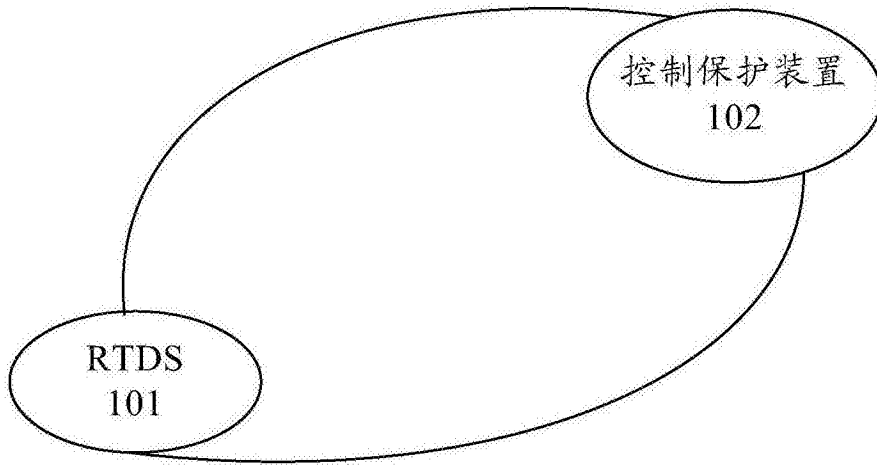


图1

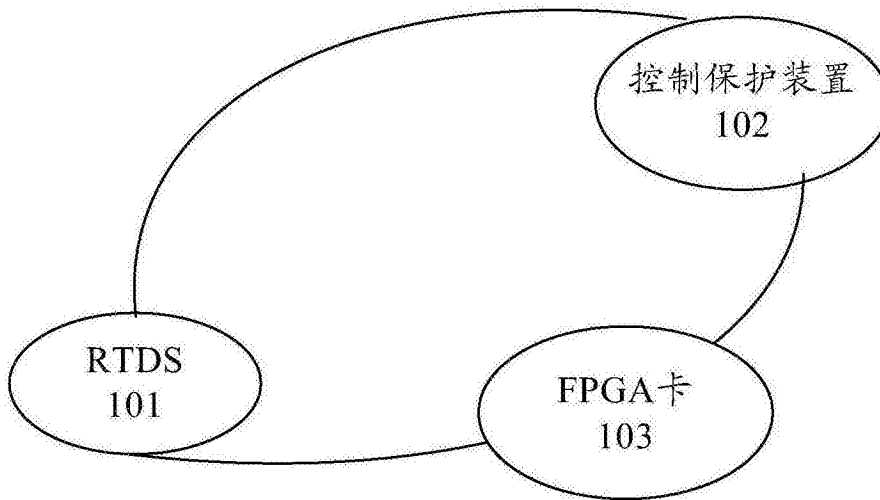


图2

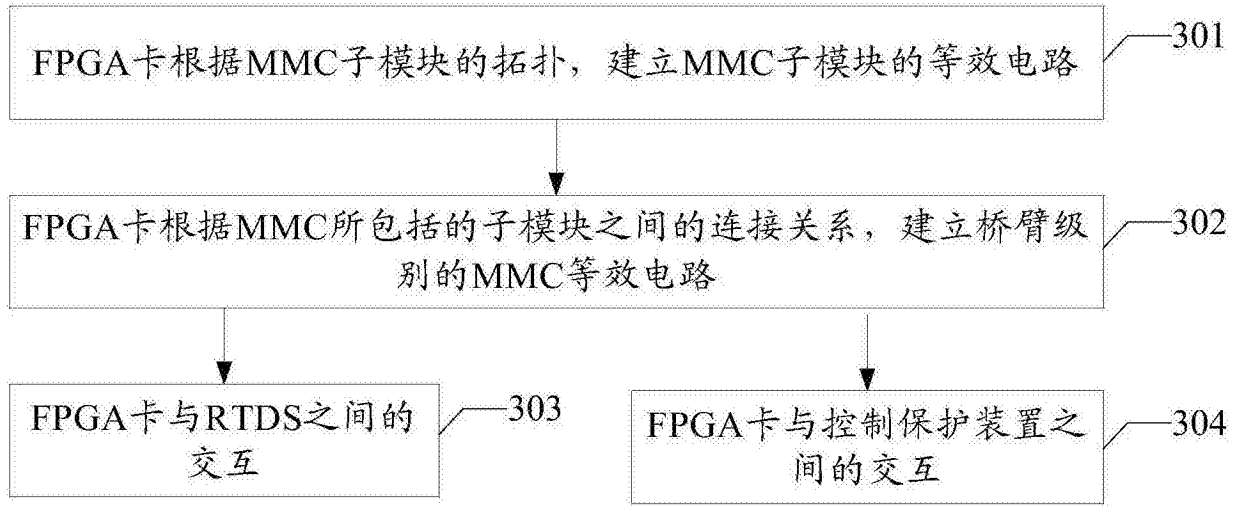


图3

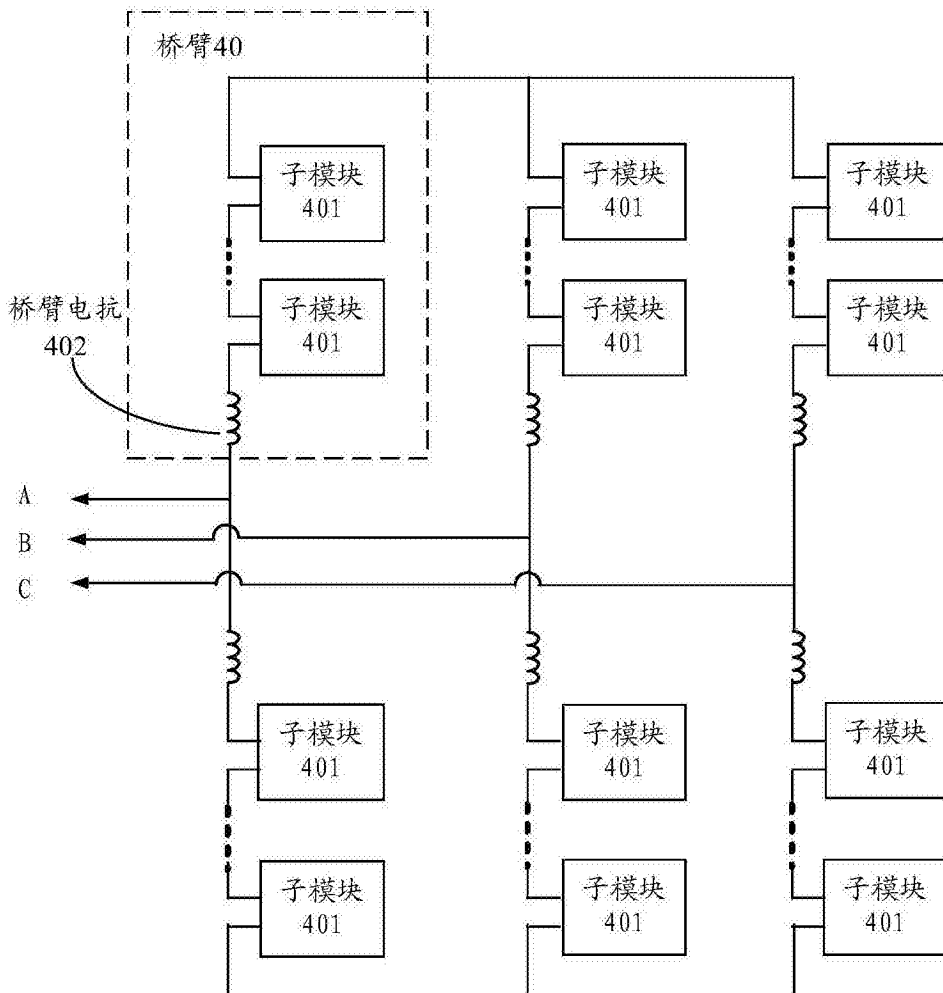


图4

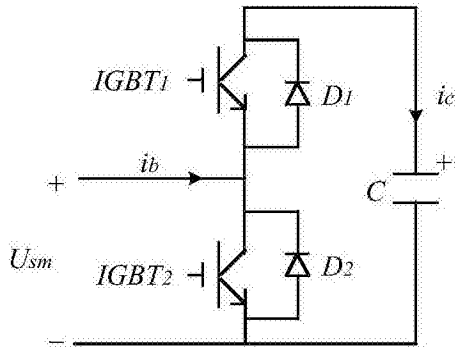


图5

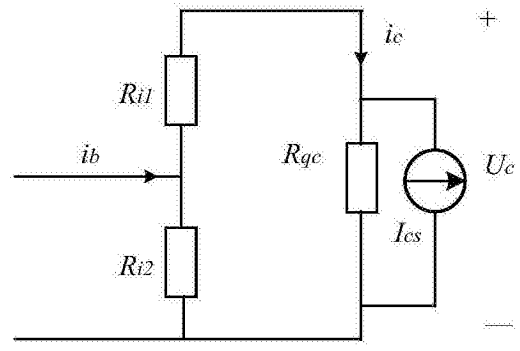


图6

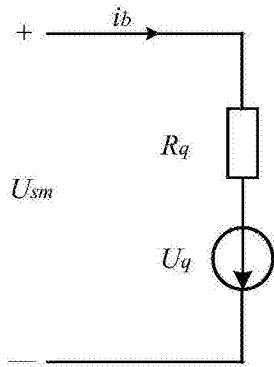


图7

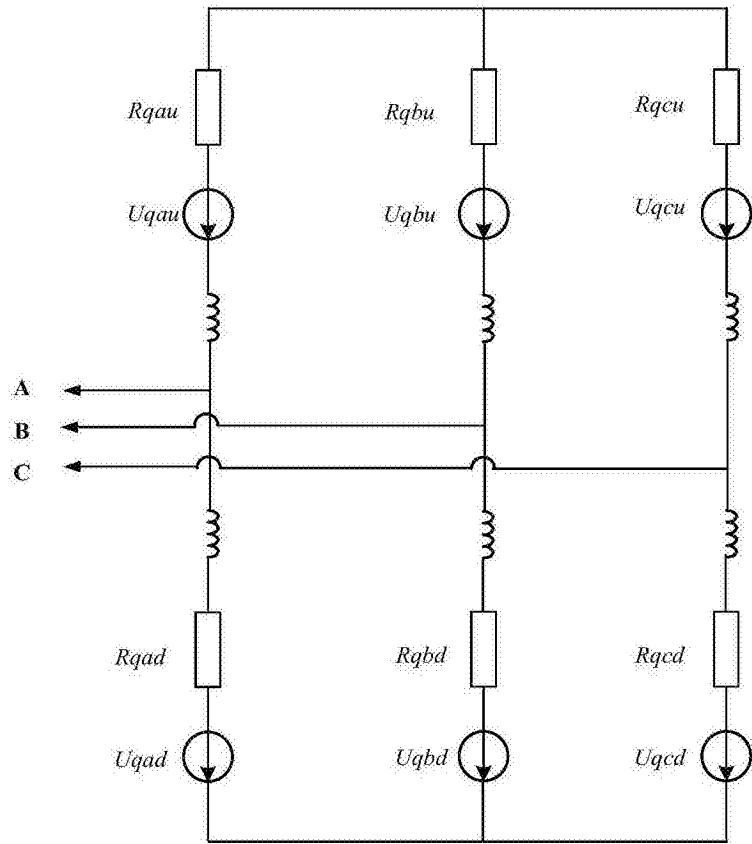


图8

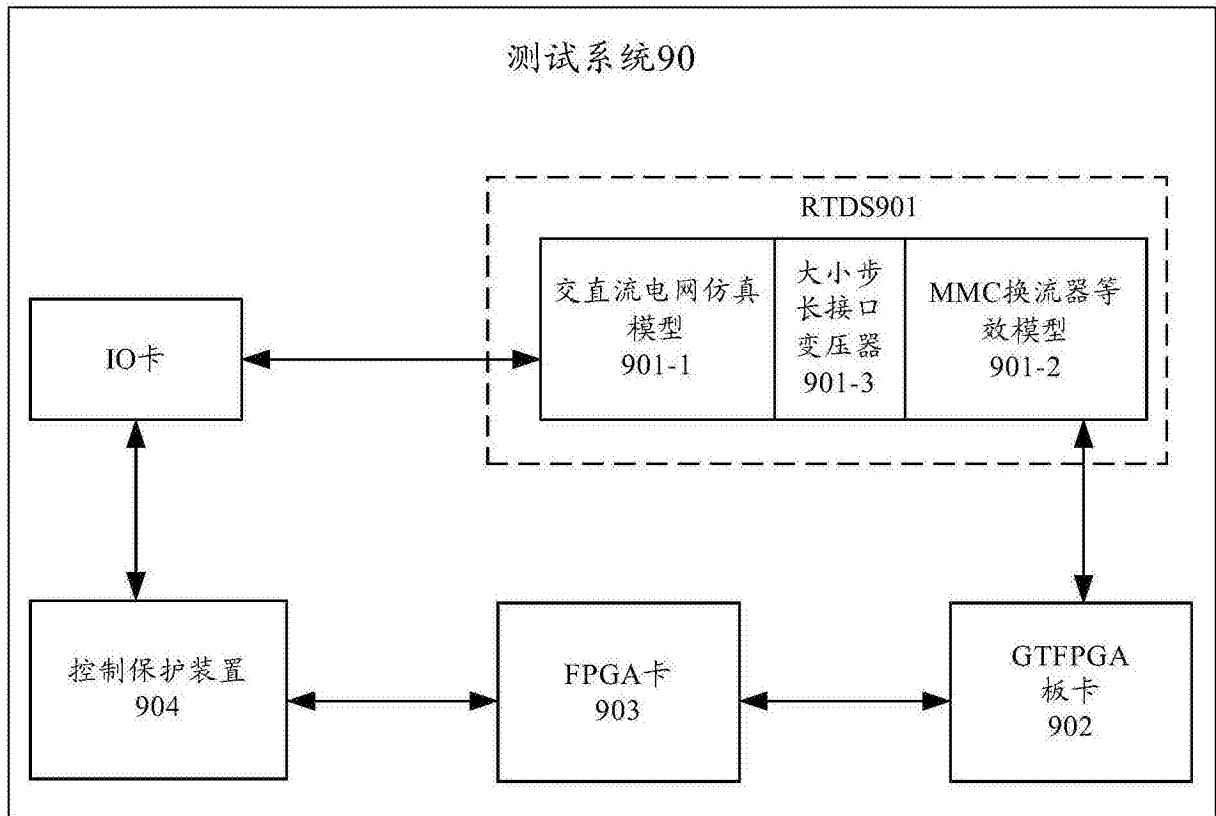


图9