



(12)实用新型专利

(10)授权公告号 CN 205608513 U

(45)授权公告日 2016.09.28

(21)申请号 201620379589.5

(ESM)同样的发明创造已同日申请发明专利

(22)申请日 2016.04.28

(73)专利权人 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

专利权人 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)

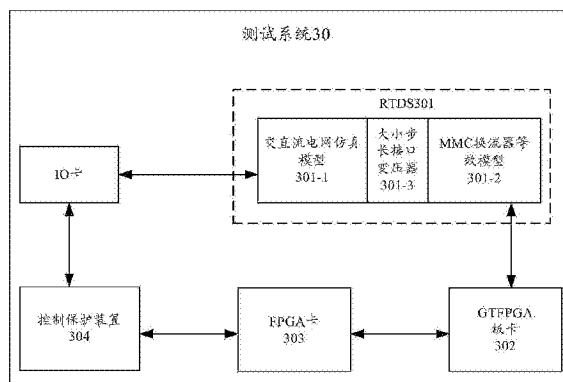
权利要求书1页 说明书6页 附图4页

(54)实用新型名称

一种柔性直流输电中控制保护装置的测试系统

(57)摘要

本实用新型公开一种柔性直流输电中控制保护装置的测试系统,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:测试系统包括:连接构成闭环的RTDS、RTDS提供的GTFPGA板卡、FPGA卡、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。本实用新型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板卡与保护控制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保护控制装置,以便保护控制装置调整控制策略,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。

3. 根据权利要求2所述的测试系统,其特征在于,

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。

4. 根据权利要求1所述的测试系统,其特征在于,

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。

5. 根据权利要求1所述的测试系统,其特征在于,

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。

6. 根据权利要求1所述的测试系统,其特征在于,所述FPGA卡具体用于:

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。

一种柔性直流输电中控制保护装置的测试系统

技术领域

[0001] 本实用新型涉及直流输电领域,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。

实用新型内容

[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,本申请提供一种柔性直流输电中控制保护装置的测试系统,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;

[0006] 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;

[0007] 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;

[0008] RTDS,用于通过IO板卡与保护控制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;

[0009] 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保护控制装置,以便保护控制装置调整控制策略,更新与RTDS所交互的模拟量和数字量。

[0010] 本实用新型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通过与保护控制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保护控制装置,以便保护控制装置调整控制策略,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

[0011] 为了更清楚地说明本实用新型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实用新型的一些实施例,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。

[0012] 图1为现有的控制保护装置的测试系统说明示意图;

[0013] 图2为本实用新型所提供的控制保护装置的测试系统说明示意图;

[0014] 图3为本实用新型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;

[0015] 图4为MMC的一端的拓扑结构示意图;

[0016] 图5为半桥型子模块的拓扑结构示意图;

[0017] 图6为半桥型子模块的等效电路图;

[0018] 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;

[0019] 图8为由三相桥臂构成的MMC的等效电路图。

具体实施方式

[0020] 下面将结合本实用新型实施例中的附图,对本实用新型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实用新型一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本实用新型中的实施例,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,都属于本实用新型保护的范围。

[0021] 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。

[0022] 本实用新型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。

[0023] 本实用新型的实施例将结合半桥型MMC子模块拓扑,对本实用新型的测试系统做示例性说明。本领域技术人员应当明白,将本实用新型的实施例中所描述的测试系统,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。

[0024] 实施例

[0025] 本实用新型的实施例提供一种柔性直流输电中控制保护装置的测试系统,结合图3所示,参照图3所示,测试系统30包括:连接构成闭环的RTDS301、RTDS301提供的GTFPGA板卡302、FPGA卡303、MMC柔性直流中的控制保护装置304以及RTDS301提供的IO板卡305。

[0026] 其中,控制保护装置304通过IO板卡305与RTDS301连接。RTDS301通过GTFPGA板卡302与FPGA卡303连接。FPGA卡303还与控制保护装置304连接。

[0027] FPGA卡303,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。

[0028] RTDS301,用于通过IO板卡305与控制保护装置304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302发送至FPGA卡303。

[0029] FPGA卡303,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304,以便控制保护装置304调整控制策略,更新与RTDS所交互的模拟量和数字量。

[0030] 在一种具体的实施方式中,RTDS301包括:大步长环境中搭建的交直流电网仿真模型301-1以及小步长环境中搭建的MMC换流器等效模型301-2以及大小步长接口变压器301-3。

[0031] 其中,交直流电网仿真模型301-1与MMC换流器等效模型301-2通过大小步长接口变压器301-3连接。交直流电网仿真模型301-1与IO板卡305通过光纤连接。MMC换流器等效模型301-2与GTFPGA板卡302通过光纤连接。

[0032] 可选的,IO板卡305与控制保护装置304通过电缆连接。控制保护装置304与FPGA卡303之间,以及FPGA卡303与GTFPGA板卡302之间通过光纤连接,基于Aurora协议完成通信。

[0033] FPGA卡303除了用于向控制保护装置304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RTDS301。

[0034] 具体的,控制保护装置304,向FPGA卡303发送MMC子模块开关的触发脉冲。FPGA卡303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。

[0035] 以下针对测试系统30中各个模块的功能做进一步说明。

[0036] FPGA卡303根据MMC子模块的拓扑,建立MMC子模块的等效电路的过程:

[0037] 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。

[0038] 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IGBT₁和IGBT₂表示),与IGBT反并联的二极管D(图5中分别用D₁和D₂表示),以及一个电容器C。

[0039] 子模块的正负输入端口之间的电压用U_{sm}表示,流入正端口的电流用i_b表示,流经电容的电流用i_c表示。

[0040] 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。

[0041] 步骤一、建立MMC子模块中电容器的诺顿等效电路。

[0042] 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_c 以及等效电流源 i_{cs} 的诺顿等效电路。

[0043] 电容两端电压 $u_c(t)$ 与流过电容的电流 $i_c(t)$ 有如下关系:

$$[0044] \quad u_{c(t)} = u_{c(t-\Delta t)} + \frac{1}{c} \int_{t-\Delta t}^t i_{c(t)} dt \quad (1-1)$$

[0045] 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:

$$[0046] \quad i_{c(t)} = \frac{2c}{\Delta t} u_{c(t)} - \left[\frac{2c}{\Delta t} u_{c(t-\Delta t)} + i_{c(t-\Delta t)} \right] \quad (1-2)$$

$$[0047] \quad \text{令 } R_c = \frac{\Delta t}{2c} \quad (1-3)$$

$$[0048] \quad \text{得到 } I_{cs(t-\Delta t)} = \frac{u_{c(t-\Delta t)} + i_{c(t-\Delta t)}}{R_c} \quad (1-4)$$

[0049] 将(1-3)、(1-4)式带入(1-2)式可得:

$$[0050] \quad i_{c(t)} = \frac{u_{c(t)}}{R_c} - I_{cs(t-\Delta t)} \quad (1-5)$$

[0051] 步骤二、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。

[0052] 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(IGBT1或IGBT2)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_{i1} 和 R_{i2} 。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_{qc} 表示电容器的诺顿等效电路中的等效电阻, I_{cs} 表示等效电流源电流, U_c 表示电容器两端的电压。

[0053] 步骤三、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。

[0054] 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)。

$$[0055] \quad U_{sm}(t) = i_b(t)R_q + U_q(t-\Delta t) \quad (1-6)$$

$$[0056] \quad \text{其中, } U_{q(t-\Delta t)} = I_{csi(t-\Delta t)} \frac{R_c R_{i2}}{R_{i1} + R_{i2} + R_c} \quad (1-7)$$

$$[0057] \quad R_q = \frac{(R_{i1} + R_c)R_{i2}}{R_{i1} + R_{i2} + R_c} \quad (1-8)$$

[0058] 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。

[0059] 经过以上三个步骤,FPGA卡303建立了MMC子模块的等效电路,进一步第,FPGA卡303根据MMC内子模块之间的连接关系,建立MMC的等效电路。

[0060] 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。

[0061] 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:

$$[0062] \quad R_{qsum} = \sum_{i=1}^n R_{qi} \quad (1-9)$$

$$[0063] \quad U_{qsum} = \sum_{i=1}^n U_{qi}(t-\Delta t) \quad (1-10)$$

[0064] 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。

[0065] FPGA卡303得到基于自定义的MMC子模块拓扑的MMC等效电路后,进一步可以通过与RTDS301以及控制保护装置304的交互,基于当前得到的MMC子模块拓扑对控制保护装置304完成测试。具体说明如下:

[0066] FPGA卡303与RTDS301之间的交互。

[0067] FPGA卡303接收RTDS301发送的桥臂电流值,其中桥臂电流值为RTDS301根据与保护控制装置所交互的模拟量和数字量生成,RTDS301可以通过与保护控制装置之间的连接与保护控制装置进行数据交互。

[0068] FPGA卡303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RTDS301发送桥臂等效电压和桥臂等效电阻。FPGA卡303可以与RTDS301提供的GTFPGA302板卡通过光纤连接,并基于Aurora协议完成数据交互。

[0069] FPGA卡303与控制保护装置304之间的交互。

[0070] FPGA卡303接收控制保护装置304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303可以与控制保护装置304通过光纤连接,并基于Aurora协议完成数据交互。

[0071] 本实用新型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通过与保护控制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保护控制装置,以便保护控制装置调整控制策略,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。

[0072] 以上,仅为本实用新型较佳的具体实施方式,但本实用新型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实用新型揭露的技术范围内,可轻易想到的变化或替换,都应涵盖在本实用新型的保护范围之内。本实用新型的保护范围应以权利要求的保护范围为准。

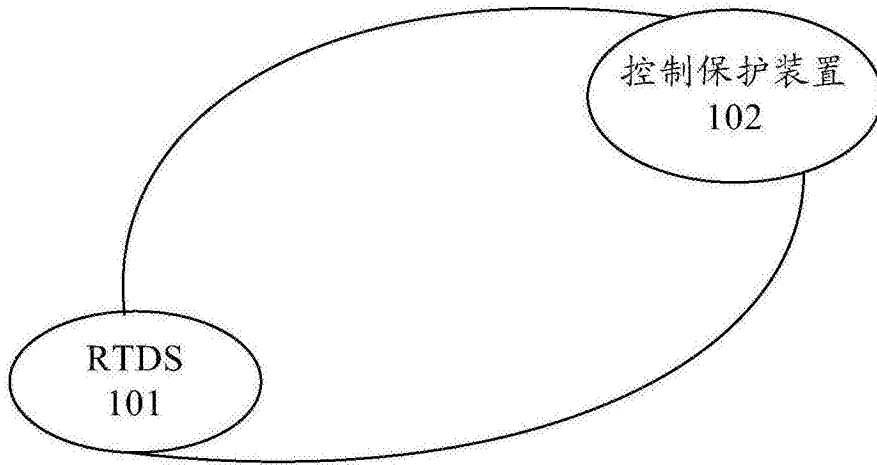


图1

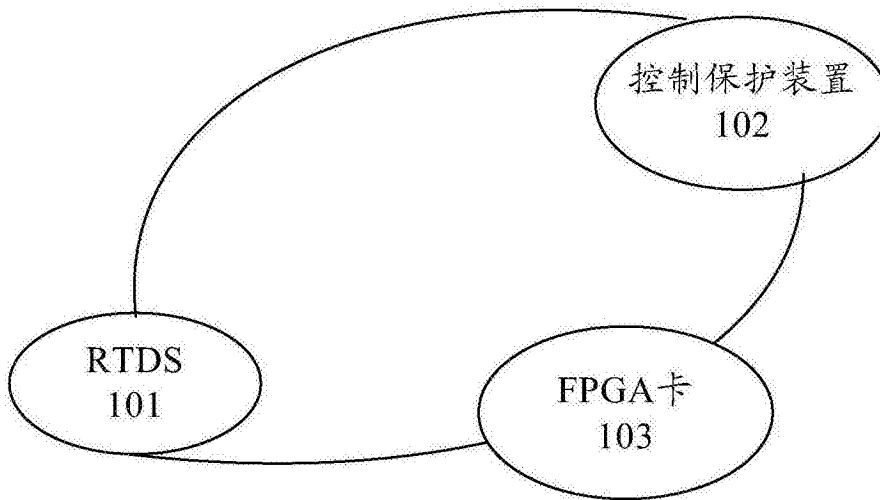


图2

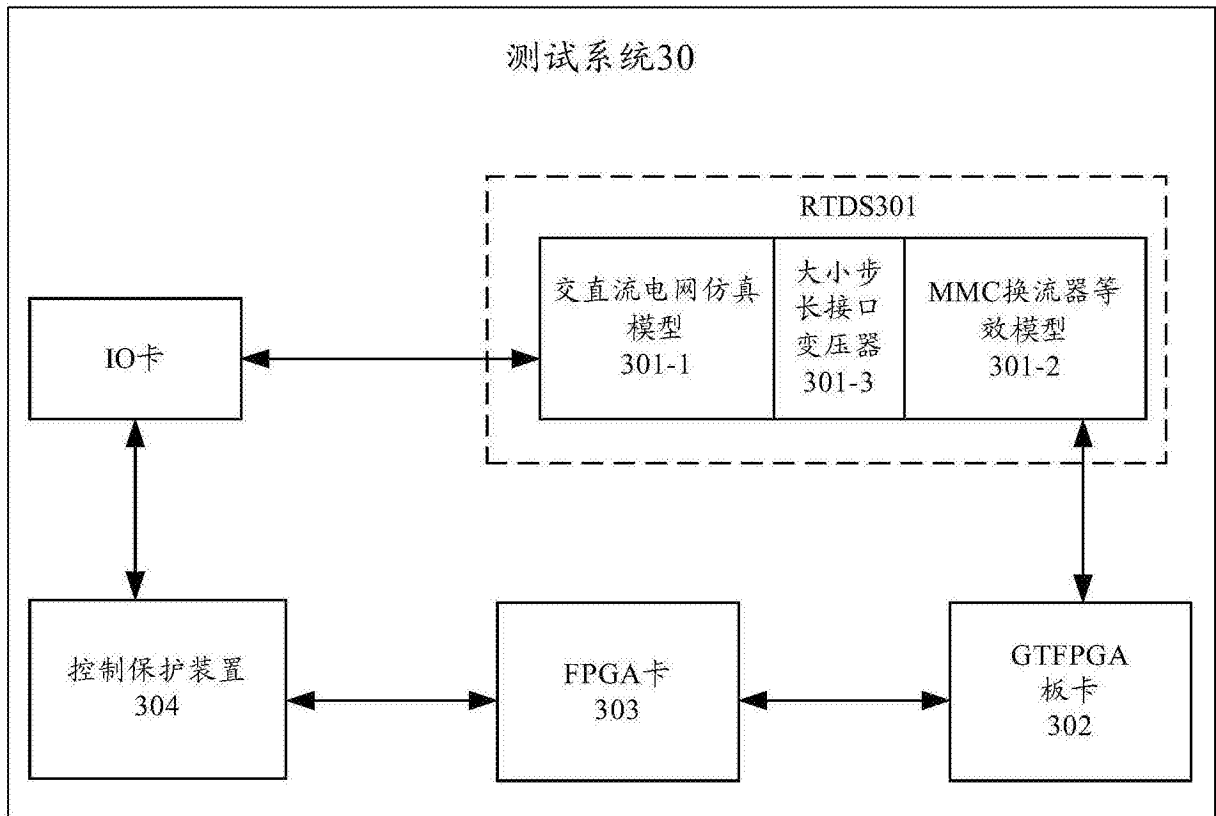


图3

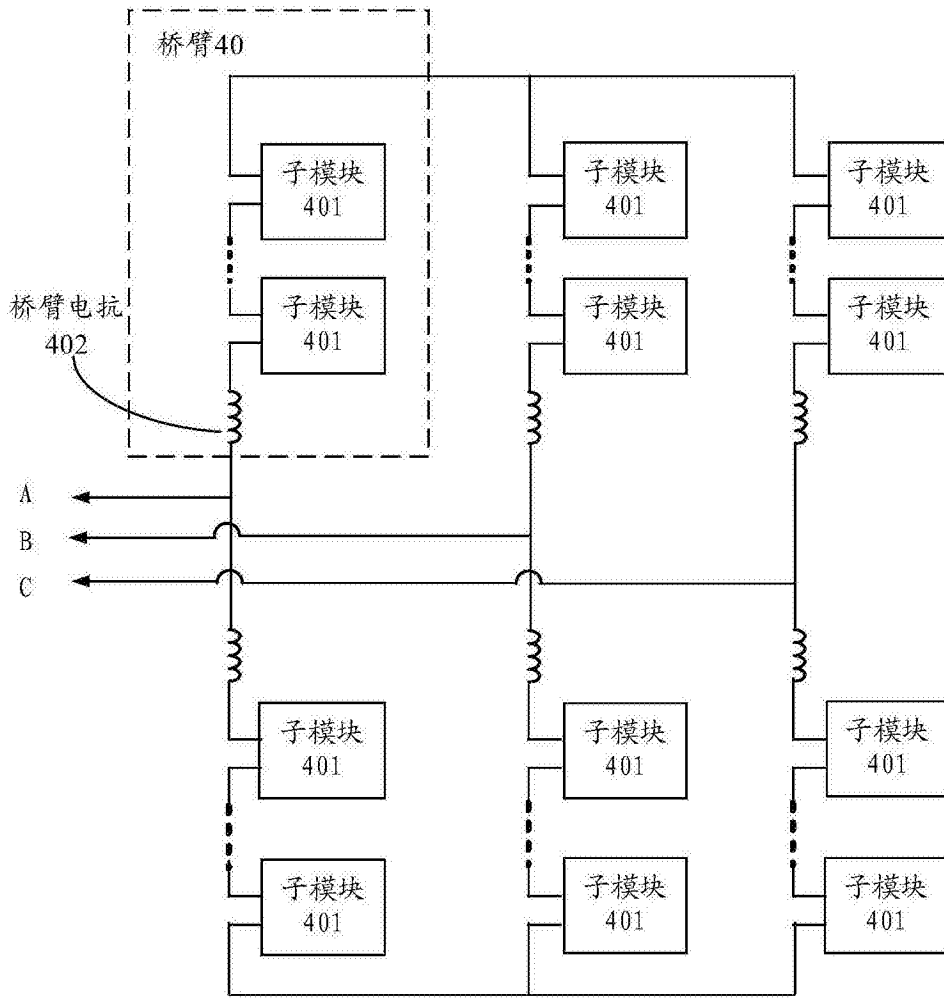


图4

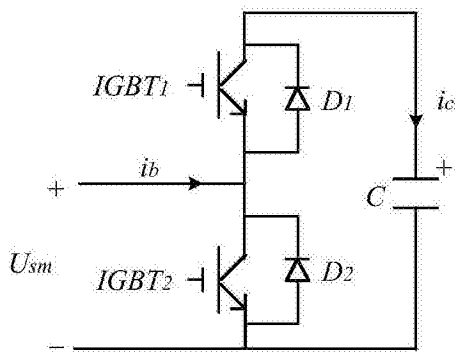


图5

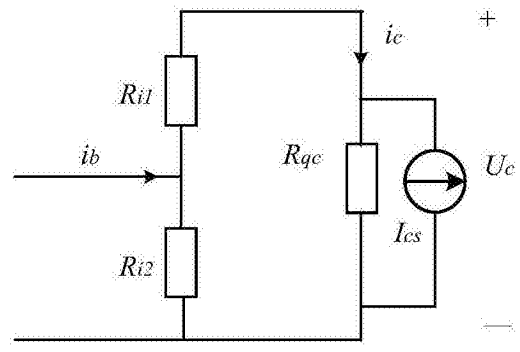


图6

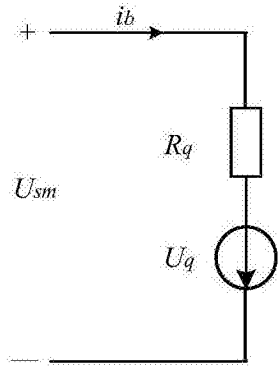


图7

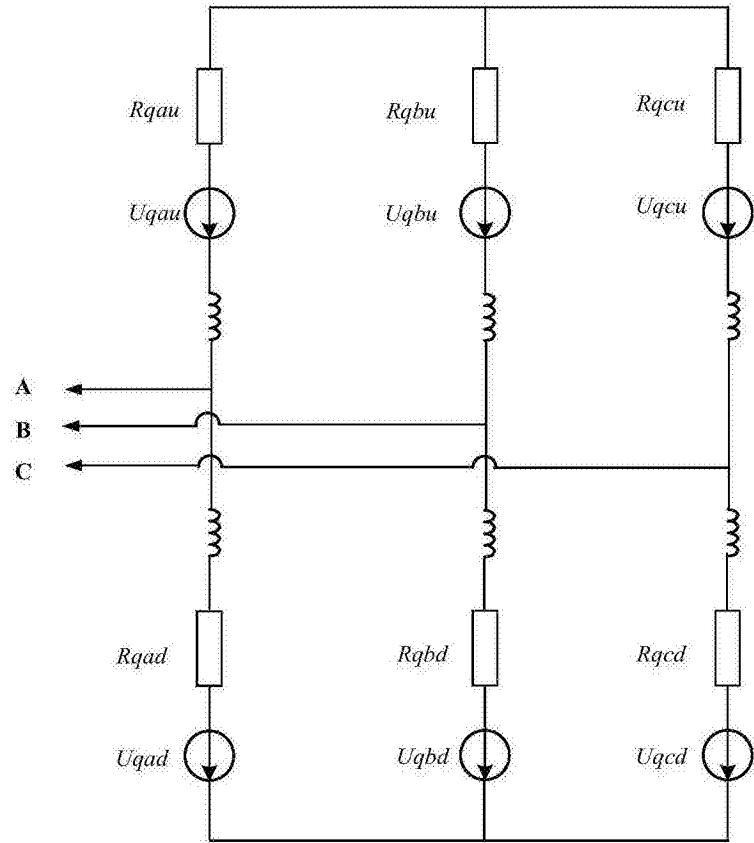


图8