



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106569417 A

(43)申请公布日 2017. 04. 19

(21)申请号 201610990508.X

(22)申请日 2016.11.10

(71)申请人 龙源电力集团股份有限公司

地址 100034 北京市西城区阜成门北大街6号-9(国际投资大厦C座)

(72)发明人 范晓旭 陆一川 吕跃刚 田涛 吴金城 李力怀

(74)专利代理机构 北京华夏正合知识产权代理事务所(普通合伙) 11017

代理人 韩登营 张焕亮

(51)Int. Cl.

G05B 17/02(2006.01)

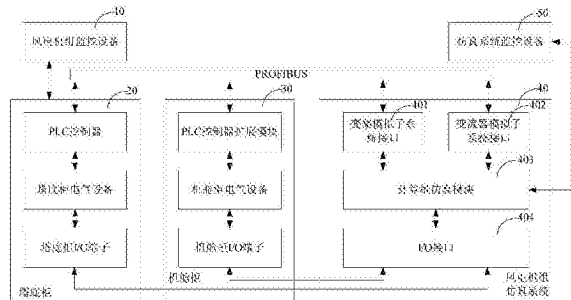
权利要求书2页 说明书12页 附图4页

(54)发明名称

一种风力发电机组计算机模拟仿真系统

(57)摘要

本发明提供一种风力发电机组计算机模拟仿真系统,包括作为真实风电机组的控制端的风电机组监控设备、塔底柜和机舱柜,以及作为被控端的风电机组仿真系统,其特征在于,所述风电机组仿真系统包括:计算机仿真模块,用于对风况、风机运行数据以及风机发电数据进行仿真模拟;通信模块,与所述计算机仿真模块通信连接,用于计算机仿真模块与所述控制端的通信。由上,风电机组仿真系统作为仿真部分,基于真实风电机组主控系统来运行。而控制端采用真实的风电机组监控设备、塔底柜和机舱柜,从而在仿真程度上与真实风电机组无异,全部以模拟仿真的形式还原出风电机组,从而在数据模拟上做到精准,能够真实反映机组运行规律的仿真系统。



1. 一种风力发电机组计算机模拟仿真系统,包括作为真实风电机组的控制端的风电机组监控设备、塔底柜和机舱柜,以及作为被控端的风电机组仿真系统,其特征在于,所述风电机组仿真系统包括:

计算机仿真模块,用于对风况、风机运行数据以及风机发电数据进行仿真模拟;

通信模块,与所述计算机仿真模块通信连接,用于计算机仿真模块与所述控制端的通信。

2. 根据权利要求1所述的系统,其特征在于,所述计算机仿真模块包括:

风模型子系统,用于进行风况模拟,以产生出自然环境下的风向、风速等数据,

变桨控制模型子系统,用于依据控制端的变桨指令,进行变桨模拟得出变桨角度数据;

风力机模拟子系统,用于依据所述变桨角度数据及风况数据,模拟风力机的机械驱动转矩和发电机电磁转矩;

传动链模型子系统,用于依据所述机械驱动转矩和发电机电磁转矩,模拟风力机的转速和加速度数据;

变流器控制模型子系统,用于将控制端所发出的发电机电磁转矩、有功功率、无功功率控制指令,转换为具体控制数据;

机侧变流器模型子系统,用于依据所述发电机电磁转矩计算出发电机转子电压;

发电机模型子系统,用于依据所述发电机转子电压进行发电模拟,输出电磁转矩、发电机转子电流、发电机定子电流、有功功率、无功功率数据;

网侧变流器模型子系统,用于将电网与机侧变流器模型子系统的数据进行关联,从而模拟出由电网向机侧变流器模型子系统提供电能的过程。

3. 根据权利要求2所述的系统,其特征在于,所述计算机仿真模块还包括:

故障模型子系统;用于根据机组设计提供的各种故障添加到对应的模拟仿真子系统中;

安全链模型子系统,用于当计算机仿真模块子系统参数出现异常或触发紧急停机时,仿真模拟异常或紧急停机的全部过程。

4. 根据权利要求2所述的系统,其特征在于,所述计算机仿真模块采用分布计算。

5. 根据权利要求4所述的系统,其特征在于,所述风力机模拟子系统和发电机模型子系统通过PXI主机仿真模拟;

所述机侧变流器模型子系统和网侧变流器模型子系统分别通过一FPGA板卡仿真模拟;

所述仿真变桨控制模型子系统和变流器控制模型子系统通过PROFIBUS板卡仿真模拟。

6. 根据权利要求2所述的系统,其特征在于,所述机侧变流器模型子系统和网侧变流器模型子系统的计算采用并行处理。

7. 根据权利要求4所述的系统,其特征在于,所述机侧变流器模型子系统所计算输出的电流,作为输入传输至网侧变流器模型子系统;

所述网侧变流器模型子系统所计算输出的电压,作为输入传输至所述机侧变流器模型子系统。

8. 根据权利要求5所述的系统,其特征在于,所述计算机仿真模块整体的仿真步长为1ms;

所述机侧、网侧变流器模型子系统分别采用一工作频率为40MHz的FPGA板卡,以10 μ s为

计算步长,在1ms时间内,两FPGA板卡循环运算100个周期。

9. 根据权利要求8所述的系统,其特征在于,所述PXI主机与所述FPGA板卡采用DMA通信,在FPGA写入和读取数据时采用FIFO方式。

一种风力发电机组计算机模拟仿真系统

技术领域

[0001] 本发明涉及风电机组仿真技术领域,特别涉及一种风力发电机组计算机模拟仿真系统。

背景技术

[0002] 在风力发电领域,广泛使用双馈型风力发电机组,目前有数万台机组承担着发电任务。双馈型风电机组属于复杂的大型机电设备,涉及机械工程、空气动力、电机、计算机、控制等多个领域的理论与技术,了解及掌握机组的特性及运行规律,是从事检修、运行及管理工作人员需要掌握的知识,能够真实反映机组运行规律的仿真系统可以在培训工作中发挥重要作用。

[0003] 与实际风电机组相比,通过计算机仿真来模拟机组的运行具有明显的优点。首先,计算机仿真可以通过曲线、数据等展现机组更多的内部运行过程,使信息更丰富;其次,计算机仿真可以根据需要随时改变风速等重要输入量,展现机组的各种运行状态,甚至制造在实际中不容易发生的各种故障,使培训更有效;另外,计算机仿真的运行成本低,不需要实际机组运行中的大功率环境,且可以避免实际机组可能出现的安全事故所带来的人员及经济损失。

[0004] 目前的风力发电机组仿真工作主要分为两种:

[0005] 一种是完全依靠计算机软件来实现的风电机组仿真,一般是通过软件建立风电机组的数学模型,通过对模型施加输入信号来模拟机组运行,并通过模型输出来查看机组运行参数,观察机组转速、功率、电压/电流等随风速的变化情况。这种仿真过程由于彻底脱离实际设备,使得仿真系统与实际设备的运行参数存在差别,仿真参数一般只反映与仿真模型有关的数个参数,而一台机组的实际参数有上百个。另外,这种仿真过程一般只反映某给定条件下的机组运行过程,而并不关心机组在其他各种条件下的全面运行过程,其全面运行仿真过程应包括机组待机、启动、并网、升降负荷、偏航、解缆、停机及各种故障的处理等。因此,这种仿真过程一般常在研究风电机组的某个特定问题中见到。

[0006] 另一种仿真系统是采用计算机与实际设备结合的方式。目前常见的结构是机组的旋转设备由电机、传动机构及齿轮箱代替,控制部分由计算机代替,仿真过程是:在计算机中模拟风速及风力机,将风力机输出转矩信号通过I/O接口施加到实际的伺服电机,由电机通过齿轮箱将转矩传递给发电机,发电机通过变频器控制进入实际发电过程。这种仿真叫半物理仿真,优点是可以直观看到模拟机组的运行过程,具有一定培训价值,而且通过对实际模拟机组的控制,可以进行控制方法的研究。这种仿真系统的物理部分与实际机组存在较大差别,如风力机换成了伺服电动机等,因此不能使用现场实际控制设备参与仿真。进一步的,由于物理设备难以做到与实际机组一致,因此,仿真过程与实际机组运行过程存在较大差异。

发明内容

[0007] 有鉴于此,本发明的主要目的在于,提供一种风力发电机组计算机模拟仿真系统,包括作为真实风电机组的控制端的风电机组监控设备、塔底柜和机舱柜,以及作为被控端的风电机组仿真系统,其特征在于,所述风电机组仿真系统包括:

[0008] 计算机仿真模块,用于对风况、风机运行数据以及风机发电数据进行仿真模拟;

[0009] 通信模块,与上述计算机仿真模块通信连接,用于计算机仿真模块与上述控制端的通信。

[0010] 由上,风电机组仿真系统作为仿真部分,基于真实风电机组主控系统来运行。而控制端采用真实的风电机组监控设备、塔底柜和机舱柜,从而在仿真程度上与真实风电机组无异,全部以模拟仿真的形式还原出风电机组,从而在数据模拟上做到精准,能够真实反映机组运行规律的仿真系统。

[0011] 可选的,上述计算机仿真模块包括:

[0012] 风模型子系统,用于进行风况模拟,以产生出自然环境下的风向、风速等数据,

[0013] 变桨控制模型子系统,用于依据控制端的变桨指令,进行变桨模拟得出变桨角度数据;

[0014] 风力机模拟子系统,用于依据上述变桨角度数据及风况数据,模拟风力机的机械驱动转矩和发电机电磁转矩;

[0015] 传动链模型子系统,用于依据上述机械驱动转矩和发电机电磁转矩,模拟风力机的转速和加速度数据;

[0016] 变流器控制模型子系统,用于依据控制端所发出的发电机电磁转矩、有功功率、无功功率控制指令,转换为具体控制数据;

[0017] 机侧变流器模型子系统,用于依据上述发电机电磁转矩控制指令,再由模型计算出发电机转子电压;

[0018] 发电机模型子系统,用于依据上述发电机转子电压进行发电模拟,输出电磁转矩、发电机转子电流、发电机定子电流、有功功率、无功功率数据;

[0019] 网侧变流器模型子系统,用于电网与机侧变流器模型子系统的数据进行关联,从而模拟出由电网向机侧变流器模型子系统提供电能的过程。

[0020] 可选的,上述计算机仿真模块还包括:

[0021] 故障模型子系统;用于根据机组设计提供的故障信息,将各种故障添加到对应的模拟仿真子系统中;

[0022] 安全链模型子系统,用于当计算机仿真模块的其它子系统参数出现异常或危险触发紧急停机时,仿真模拟紧急停机的全部过程。

[0023] 可选的,上述计算机仿真模块采用分布计算。

[0024] 由上,风电机组仿真系统在时间上需要配合上述主控系统的控制时序,基于控制时间、频率等满足半物理仿真的实时性要求。

[0025] 可选的,上述风力机模拟子系统和发电机模型子系统通过PXI主机仿真模拟;

[0026] 上述机侧变流器模型子系统和网侧变流器模型子系统分别通过一FPGA板卡仿真模拟;

[0027] 上述仿真变桨控制模型子系统和变流器控制模型子系统通过PROFIBUS板卡仿真模拟。

[0028] 由上,风电机组仿真系统内的各部件间通过数据通信等方式连接为一个整体,且需要根据系统所设计的硬件结构解决数据的实时高速同步。

[0029] 可选的,所述机侧变流器模型子系统和网侧变流器模型子系统的计算采用并行处理。

[0030] 可选的,所述机侧变流器模型子系统所计算输出的电流,作为输入传输至网侧变流器模型子系统;

[0031] 所述网侧变流器模型子系统所计算输出的电压,作为输入传输至所述机侧变流器模型子系统。

[0032] 可选的,所述计算机仿真模块整体的仿真步长为1ms;

[0033] 所述机侧、网侧变流器模型子系统分别采用一工作频率为40MHz的FPGA板卡,以10 μ s为计算步长,在1ms时间内,两FPGA板卡循环运算100个周期。

[0034] 由上,FPGA板卡中除了需要求解上述变流器仿真所涉及到的四阶和六阶方程组外,还包含SVPWM算法等仿真,因此计算的工作量很大,即使采用软件固化的FPGA,在顺序计算的情况下也无法满足与主控系统控制时序的同步,基于上述方案,两FPGA板卡若均以10 μ s为计算步长,即要求1ms时间内,两FPGA板卡循环运算100个周期,生成长度为100的数组作为1ms一次的计算结果。从而在1ms主仿真周期内,机侧和网侧FPGA板卡可以实现与主控系统进行数据的交换和同步。

[0035] 可选的,所述PXI主机与所述FPGA板卡采用DMA通信,在FPGA写入和读取数据时采用FIFO方式。

[0036] 由上,当FPGA与PXI主机进行数据交换时,FPGA会先把数据放到FIFO的数据缓存器中,而不需要等待DMA的读取,这样可以最大程度的避免延时或者丢包的现象。为保证在1ms的时钟周期内程序可以完成一次循环。

附图说明

[0037] 图1为风力发电机组计算机模拟仿真系统的原理示意图;

[0038] 图2为计算机仿真模块的原理示意图;

[0039] 图3为机侧变流器模型子系统所采用FPGA板卡的电路原理示意图;

[0040] 图4为网侧变流器模型子系统所采用FPGA板卡的电路原理示意图;

[0041] 图5为机侧变流器模型子系统和网侧变流器模型子系统间所采用的并行处理原理示意图;

[0042] 图6为风力发电机组计算机模拟仿真系统的硬件原理示意图;

[0043] 图7为风电机组仿真系统主要参数曲线界面图。

具体实施方式

[0044] 为克服现有技术存在的缺陷,本发明提供一种风力发电机组计算机模拟仿真系统,如图1所示为风力发电机组计算机模拟仿真系统的原理示意图,其中,风电机组监控设备10、塔底柜20和机舱柜30作为真实风电机组的控制端,其中,塔底柜20和机舱柜30采用PROFIBUS通信总线连接为一个主控系统。该主控系统的核心是塔底柜20中的PLC控制器,也是整个主控系统的控制中枢。主控系统随时获得后文所述风电机组仿真系统40的仿真数

据,并向风电机组仿真系统40发出各种控制指令,所述仿真数据及控制指令通过所述PROFIBUS通信总线及机柜信号端子传输。同时,主控系统还通过网络与风电机组监控设备10通信,以实现人、机交互功能。上述主控系统的相关部分采用现有技术实现,不进行赘述。

[0045] 本发明着重于风电机组仿真系统40,包括计算机仿真模块403,以及用于其与外界通信的变桨模拟子系统接口401、变流器模拟子系统接口402和机舱柜I/O端子403。

[0046] 如图2所示为计算机仿真模块403的原理示意图,包括风模型子系统406、风力机模拟子系统407、变桨控制模型子系统408、传动链模型子系统409、发电机模型子系统410、变流器控制模型子系统411、机侧变流器模型子系统412、网侧变流器模型子系统413、安全链模型子系统414和故障模型子系统415组成。

[0047] 本发明所述的塔底柜20、机舱柜30通过PROFIBUS通信总线与风电机组仿真系统40连接,以对风电机组仿真系统40进行控制。其控制原理是将所述主控系统中的PLC控制器与风电机组仿真系统40中的变桨控制模型子系统408及变流器控制模型子系统411连接。变桨控制模型子系统408接收所述PLC控制器的控制指令,执行变桨控制过程;同时,变桨控制模型子系统408将其所模拟的变桨角度等数据通过PROFIBUS通信总线反馈给所述PLC控制器;变流器控制模型子系统411接收所述PLC控制器的控制指令,执行发电机电磁转矩的控制过程,并将执行结果通过PROFIBUS通信总线反馈给PLC控制器。

[0048] 另外,所述塔底柜20、机舱柜30还通过各种I/O端子与风电机组仿真系统40的I/O接口404连接,以获取风电机组仿真系统40的所有运行参数,包括风速、风向;发电机电压、电流;高速轴、低速轴转速;机舱X、Y方向的振动;偏航、转子刹车;液压系统压力、温度;齿轮箱油位、油力、油温、冷却加热器状态等;发电机定转子、轴系轴承、机舱等温度;停机、急停、待机、维护等;蓄电池、400V和24V电源状态;运行、故障等指示灯等参数。

[0049] 具体的,所述风电机组仿真系统40的工作原理如下:

[0050] 仿真开始时刻,处于停机状态,各模拟模块所对应的各种参数处于停机正常状态,这些参数通过I/O接口404输出,最终传输至塔底柜20和机舱柜30,PLC控制器读取上述参数数据后获得与实际机组在数量、特征上完全一样的信息。

[0051] 另外,所述PLC控制器还通过PROFIBUS通信总线获取所述变桨控制模型子系统408及变流器控制模型子系统411在停机状态下的初始化信息。

[0052] 此过程中,用户可以通过PLC控制器的监控平台,或者风电机组监控设备10的监控平台进行人机交互。

[0053] 进入模拟程序后,风模型子系统406进行风况模拟,以产生出自然环境下的风向、风速等数据。该风况数据通过I/O接口404输出至PLC控制器。PLC控制器依据该依据所述风况,向风电机组仿真系统40输出控制指令,包括启动、升速、变桨、并网、有功功率调节、无功功率调节到停机的全程过程的相关指令,具体指令将在后文详述。

[0054] 变桨控制模型子系统408通过变桨模拟子系统接口401接收PLC控制器的变桨指令,进行变桨模拟得出变桨角度数据,并将所述变桨角度数据反馈给PLC控制器。

[0055] 风力机模拟子系统407根据所述变桨角度数据及风况数据,模拟风力机的机械驱动转矩。

[0056] 传动链模型子系统409根据所述风力机的机械驱动转矩及发电机模型410模拟出的发电机电磁转矩,模拟机组转速和加速度等数据。

[0057] 变流器控制模型子系统411通过变流器模拟子系统接口402接收PLC控制器所发出的有功功率、无功功率以及发电机模型410模拟出的发电机电磁转矩等控制指令,由模型计算出具体的控制指令。

[0058] 机侧变流器模型子系统412用于接收变流器控制子系统411所输出的发电机电磁转矩控制指令,再由模型计算出发电机转子电压。

[0059] 发电机模型子系统410依据所述发电机转子电压进行发电机模拟,输出发电机电磁转矩、发电机转子电流、发电机定子电流、有功功率、无功功率等数据。

[0060] 网侧变流器模型子系统413将电网与机侧变流器模型子系统412的数据进行关联,从而模拟出由电网向机侧变流器模型子系统412提供电能的过程。

[0061] 安全链模型子系统414分别与其他各子系统通信连接,用于当其它子系统中的某些参数出现异常或危险触发紧急停机时,仿真模拟紧急停机的全部过程。所述参数包括超速、振动超限、发生扭缆及与控制柜自身有关的急停按钮、失电、看门狗动作等。

[0062] 故障模型子系统415分别与其他各子系统通信连接,用于根据机组设计提供的故障信息,将各种故障添加到对应的模拟仿真子系统中,一旦操作某个故障或条件触发了某个故障,将会模拟实际机组的报警及停机过程。

[0063] 辅助系统模拟子系统(未图示),包括偏航、液压、加热器、散热器、照明、供电等其它系统,这些系统均有各自程序模型及运行参数,这些参数通过计算机I/O接口传递给PLC控制器,PLC根据这些参数来控制辅助系统的相应设备,同时,这些参数也直接影响PLC控制器对整个机组发电过程的控制。

[0064] 风电机组仿真系统40的仿真对于实时性要求较高,基于此,为了通过仿真较好地展现出发电机运行时的暂态过渡过程,风电机组仿真系统40运行的仿真步长选为1ms。但从风电机组仿真系统40的总体结构来看,若采用线性的顺序执行,目前的处理器速度无法满足设计的仿真步长为1ms仿真要求。为此,风电机组仿真系统40采用了分布式计算的方案。即在风电机组仿真系统40内的各仿真模块由不同的模块进行仿真模拟。

[0065] 其中,机侧变流器模型子系统412和网侧变流器模型子系统413分别采用一工作频率为40MHz的FPGA板卡实现。

[0066] 图3所示为机侧变流器模型子系统412所采用FPGA板卡的电路原理示意图,图中 U_{dc} 表示直流母线电压; u_a 、 u_b 、 u_c 分别表示交流侧输出电压; i_a 、 i_b 、 i_c 分别表示流过电感电流; i_{ra} 、 i_{rb} 、 i_{rc} 分别表示流过负载的电流;电路图中的 r 表示滤波电阻、 c 表示滤波电容, L_1 表示电感、 R_1 表示线路阻抗。机侧变流器模型子系统412在运行时,产生电流 i_{load} ,此电流对于直流环节相当于负载。

[0067] 机侧变流器模型子系统412所采用FPGA板卡的电路包括六个IGBT管,分别为 S_{a1} 、 S_{a2} 、 S_{b1} 、 S_{b2} 、 S_{c1} 、 S_{c2} 、设 S_i 为 i 相桥臂的开关函数($i=a,b,c$),桥臂的上(S_{i1})、下(S_{i2})两管导通、关断状态为:

$$[0068] \quad S_i = \begin{cases} 1, & \text{开关 } S_{i1} \text{ 导通, 开关 } S_{i2} \text{ 关断;} \\ 0, & \text{开关 } S_{i1} \text{ 关断, 开关 } S_{i2} \text{ 导通;} \end{cases} \quad i = a, b, c$$

[0069] 其函数模型表示如公式(2-1)和(2-2)所示:

$$[0070] \quad \begin{cases} 3L_1 \frac{di_a}{dt} = -3R_1 i_a - 3u_a + 2s_a U_{dc} - s_b U_{dc} - s_c U_{dc} \\ 3L_1 \frac{di_b}{dt} = -3R_1 i_b - 3u_b - s_a U_{dc} + 2s_b U_{dc} - s_c U_{dc} \\ 3L_1 \frac{di_c}{dt} = -3R_1 i_c - 3u_c - s_a U_{dc} - s_b U_{dc} + 2s_c U_{dc} \end{cases} \quad (2-1)$$

$$[0071] \quad \begin{cases} c \frac{du_a}{dt} = (1 - \frac{rR_1 c}{L_1}) i_a - \frac{rc}{L_1} u_a - i_{ra} - rc \frac{di_{ra}}{dt} + \frac{(2s_a - s_b - s_c)rc U_{dc}}{3L_1} \\ c \frac{du_b}{dt} = (1 - \frac{rR_1 c}{L_1}) i_b - \frac{rc}{L_1} u_b - i_{rb} - rc \frac{di_{rb}}{dt} + \frac{(-s_a + 2s_b - s_c)rc U_{dc}}{3L_1} \\ c \frac{du_c}{dt} = (1 - \frac{rR_1 c}{L_1}) i_c - \frac{rc}{L_1} u_c - i_{rc} - rc \frac{di_{rc}}{dt} + \frac{(-s_a - s_b + 2s_c)rc U_{dc}}{3L_1} \end{cases} \quad (2-2)$$

[0072] 图4所示为网侧变流器模型子系统413所采用FPGA板卡的电路原理示意图,图中 u_A 、 u_B 、 u_C 分别表示网侧变流器的交流侧三相电网电压, i_A 、 i_B 、 i_C 为交流侧三相流入电流,电路图中的电阻 R_2 和电感 L_2 分别为进线电抗器等效电阻及电感, C 为直流环节电容, U_{dc} 、 i_{dc} 分别为直流母线电压及电流, i_{load} 为负载电流。

[0073] 网侧变流器模型子系统413所采用FPGA板卡的电路包括六个IGBT管,分别为 S_{A1} 、 S_{A2} 、 S_{B1} 、 S_{B2} 、 S_{C1} 、 S_{C2} 、设 S_I 为I相桥臂的开关函数($I=A,B,C$),桥臂的上(S_{I1})、下(S_{I2})两管导通、关断状态为:

$$[0074] \quad S_I = \begin{cases} 1, & \text{开关 } S_{I1} \text{ 导通, 开关 } S_{I2} \text{ 关断;} \\ 0, & \text{开关 } S_{I1} \text{ 关断, 开关 } S_{I2} \text{ 导通;} \end{cases} \quad I = A, B, C$$

[0075] 其函数模型表示如公式(2-3)所示:。

$$[0076] \quad \begin{cases} \frac{di_A}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} i_A - \frac{1}{L_2} \left(S_A - \frac{(S_A + S_B + S_C)}{3} \right) U_{dc} + \frac{1}{L_2} u_A \\ \frac{di_B}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} i_B - \frac{1}{L_2} \left(S_B - \frac{(S_A + S_B + S_C)}{3} \right) U_{dc} + \frac{1}{L_2} u_B \\ \frac{di_C}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} i_C - \frac{1}{L_2} \left(S_C - \frac{(S_A + S_B + S_C)}{3} \right) U_{dc} + \frac{1}{L_2} u_C \\ \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} (S_A i_A + S_B i_B + S_C i_C) - \frac{1}{C} i_{load} \end{cases} \quad (2-3)$$

[0077] 机侧变流器模型子系统412在FPGA板卡中除了需要求解上述(公式(2-1)和(2-2)所对应的)六阶方程组外,还包含SVPWM算法(其控制器包含在电机模型内)。

[0078] 网侧变流器模型子系统413在FPGA板卡中除了需要求解上述(公式(2-3)所对应的)四阶方程组外,还包含SVPWM算法以及网侧控制器,因此计算的工作量很大,即使采用软件固化的FPGA,在顺序计算的情况下也无法满足 $10\mu s$ 的计算周期。为此,本实施例采用两块FPGA板卡分别仿真网侧变流器模型和机侧变流器模型,其计算采用并行处理的形式,工作原理如图5所示:机侧变流器模型子系统412通过公式(2-1)和(2-2)所计算出的电流 i_{load} 输出至网侧变流器模型子系统413,网侧变流器模型子系统413采用该数值结合公式(2-3)计

算出直流母线电压 U_{dc} ,输入至机侧变流器模型子系统412。机侧变流器模型子系统412和网侧变流器模型子系统413所采用的FPGA板卡,均以 $10\mu s$ 为计算步长,即要求 $1ms$ 时间内,两FPGA板卡须循环运算100个周期,生成长度为100的数组作为 $1ms$ 一次的计算结果。通过上述批量数据交换的方式,即在 $1ms$ 主仿真周期内,机侧和网侧FPGA通过与后文所述的PXI主机的DMA通道间接实现板卡模型间有关直流环节电压和电流数据的交换和同步。模型仿真达到仿真步长 $1ms$ 的实时在线运行要求,实现了与真实物理控制设备高速协调运行的目的。

[0079] 由于采用了上述分布式计算的处理方式,风电机组仿真系统40的各部件间必须通过数据通信等方式才能连接为一个整体,且需要根据系统所设计的硬件结构解决数据的实时高速同步。如图6所示,风电机组仿真系统40通过PXI机箱实现,该PXI机箱分部与上位机(风电机组监控设备10)和主控系统(PLC控制器)连接。

[0080] PXI机箱集成了PXI主机、FPGA板卡和PROFIBUS板卡,它们由机箱背板的系统总线相连,其中PXI主机与FPGA板卡、PROFIBUS板卡之间以直接内存存取(DMA, Direct Memory Access)方式实现硬件之间数据的实时传输。

[0081] PXI主机为NI公司产品,内含Intel i7四核处理器,配有千兆以太网口,同时搭载NI LabVIEW实时操作系统内核,配合LabVIEW软件的实时模块,可以实现基于 $1MHz$ 时钟的定时结构程序。PXI主机在NI LabVIEW实时操作系统支持下,分别将其中的两个处理器专门定义为风力机模拟子系统407和发电机模型子系统410的仿真。另外,所述PXI主机的其他处理器还用于风模型子系统406、传动链模型子系统409、安全链模型子系统414和故障模型子系统415的模拟仿真。

[0082] FPGA板卡上集成了FPGA芯片,工作频率高达 $40MHz$,利用FPGA芯片的高速运算能力和实时特性可实现机侧变流器模型子系统412和网侧变流器模型子系统413的实时仿真。

[0083] PROFIBUS板卡是一款NI公司与COMSOFT公司共同开发的支持PCI PROFIBUS接口的板卡。本实施例使用两块PROFIBUS板卡作为从站,仿真变桨控制模型子系统408和变流器控制模型子系统411的通信应答部分,实现了模拟的风力机、发电机(PXI主机仿真)与主控系统(PLC控制器)的总线连接。

[0084] 本实施例采用了多种通信方式来实现分布式仿真部件间的数据交换,包括:

[0085] PXI主机与FPGA板卡的DMA通信。

[0086] DMA允许不同频率的硬件系统相互沟通,而不需要依赖于CPU中的大量中断负载,在DMA的控制下,存储器和外部设备之间可以直接进行数据传送,传送过程不需要CPU的参与。PXI主机程序的定时循环为 $1ms$,而FPGA板卡的周期仅为 $25ns$,时钟域相差极大,所以在FPGA写入和读取数据时需要用到先入先出队列(FIFO, First Input First Output)进行缓冲。当FPGA与PXI主机进行数据交换时,FPGA会先把数据放到FIFO的数据缓存器中,而不需要等待DMA的读取,这样可以最大程度的避免延时或者丢包的现象。为保证在 $1ms$ 的时钟周期内程序可以完成一次循环,本实施例采取超时不等待的策略,数据发送完毕后,PXI主机通过DMA将FPGA上的FIFO缓存中的数据读取出来,送入下一级运算。

[0087] 主控系统(PLC控制器)与PXI主机的PROFIBUS-DP总线通信。

[0088] 在双馈风力发电机组中,主控系统除去通过I/O端口与PXI主机交换信号外,还需要与变频控制系统(即上述发电机模型子系统410)和变桨系统(即上述风力机模拟子系统407)进行通信。仿真平台采用PROFIBUS-DP单主站系统进行通信,通信速率选择 $1.5Mbit/s$

sec的波特率,根据实际主控系统的要求,通信系统扫描周期不小于20ms。整体通信采用一主二从的策略,主站与从站之间采用轮询的通信方式。PLC主控制器为主站,两块PROFIBUS板卡为通信的两个从站,并以程序分别仿真了风电机组的变频控制系统与变桨系统。两块PROFIBUS板卡均通过机箱背板以DMA方式与PXI主机传递数据,通信程序与主仿真程序一并执行。

[0089] 所述PLC主控制器通过PROFIBUS总线与变桨控制模型子系统408、以及变流器控制模型子系统411之间的信号信息分别下表1、表2所示:

序号	描述
1	桨距角位置
2	变桨速度及加速度信号
3	故障信息
4	润滑油状态
5	变桨系统各点温度
6	电容或蓄电池状态
7	电机参数
8	充电电流
9	限位开关位置反馈
10	电源状态
11	手动、自动及紧急模式
12	编码器状态
13	安全链
14	心跳

表 1

序号	描述
1	变流器启动、运行等状态信号
2	并网信号
3	直流母线状态信号
4	转矩指令
5	网测变流器状态
6	机侧变流器状态
7	加热信号
8	电源状态
9	心跳

表 2

[0090]

[0091] 上位机与PXI主机的UDP通信。

[0092] 上位机监控界面需要接收由PXI主机程序发出的机组监控变量以及PLC控制器的I/O状态信号,使用户可以方便的看到当前机组运行的状态;同时,用户可以操作监控界面中的风速设定部分和故障模拟部分,并将改变的数据信号发送给PXI主机中,来改变当前的模型参数。采用UDP通信主要是考虑到通信的速度要求,因为设计上需要将每一个仿真主周期的仿真结果传送到上位机监控系统中显示,经测试在1ms时间内,系统能够实现上述要求。

[0093] FPGA板卡与塔底和机舱控制柜间的I/O接口通信。

[0094] FPGA板卡从电机模型接收到数据后,除去一部分用于机侧变流器模型子系统412、网侧变流器模型子系统413的计算外,其余数据需要经由FPGA板卡的模拟量和数字量通道写入PLC控制器的I/O端口中,最终送入主控系统,并接收由主控系统反馈的模数信号。这里每块FPGA板卡由8路AI通道、8路AO通道以及96路DIO线构成。

[0095] 机舱柜与塔底柜I/O端子与I/O接口404通过信号电缆相连接,传输的信息如下列表3所示:

[0096]

序号	信号描述
1	变桨系统(MOOG 公司)
2	润滑油泵
3	偏航刹车全开
4	偏航刹车半开
5	转子刹车打开
6	转子刹车闭合
1	齿轮箱油位信号
2	齿轮箱润滑油压力信号
3	齿轮箱油泵保护信号
4	齿轮箱加热器保护信号
5	齿轮箱冷却风扇保护信号
6	齿轮箱油泵待机加热器保护信号
7	发电机水泵待机加热器保护信号
8	变桨系统供电信号
9	停机按钮信号
10	重启按钮信号
11	紧急停机开关信号
12	维护模式开关信号
13	齿轮箱润滑油过滤器压力正常信号
14	远程紧急停机开关信号
15	远程按钮停机信号
16	远程按钮启动
17	左偏航按钮信号
18	右偏航按钮信号
19	开桨按钮信号
20	顺桨按钮信号
21	转子刹车打开信号
26	航空灯保护信号
27	偏航刹车保护信号
29	转子螺栓锁定信号
30	转子螺栓打开信号
31	机舱柜加热器
32	变桨电池供电信号
33	发电机冷却风扇保护信号
34	偏航保护正常信号
35	发电机电刷信号
36	发电机冷却风扇保护信号 2
37	偏航电机 1 保护信号 1
38	偏航电机 2 保护信号 2

[0097]

39	偏航电机 3 保护信号 3
40	偏航电机 4 保护信号 4
41	偏航轴承润滑完成信号
42	偏航轴承润滑油油位信号
43	偏航软启待机信号
44	液压泵保护信号
45	偏航向左信号
46	偏航向右信号
48	液压油温度信号
49	液压油油位信号
50	转子刹车片警告信号
51	转子刹车片停止信号
52	转子刹车打开信号
53	液压转子刹车压力正常信号
54	液压油加热器保护信号
59	偏航齿面润滑结束信号
60	防雷模块正常
7	发电机冷却风扇 2 (继电器控制)
8	变桨旁路 (预留)
9	变桨安全输入 (滑环紧急停机相关)
11	齿轮箱润滑油泵 (高速)
12	齿轮箱润滑油泵 (低速)
13	齿轮箱润滑油加热器
14	齿轮箱冷却风扇 (高速)
15	齿轮箱冷却风扇 (低速)
16	齿轮箱油泵待机加热器
17	齿轮箱润滑油泵 (高速)
18	发电机加热器
19	发电机冷却风扇 1
20	齿轮箱冷却风扇 (高速)
21	偏航轴承润滑泵
22	液压泵启动
23	液压油加热器
24	偏航软启
25	向左偏航
26	向右偏航
27	偏航液压刹车全开
28	偏航液压刹车半开
29	偏航电机全开
30	转子刹车打开

[0098]

31	转子刹车闭合
62	紧急停机 (远程控制)
63	超速
64	振动
65	紧急停机 (扭缆)
66	紧急停机 (滑环)
67	超速
68	重启
33	变桨旁路
34	安全链偏航输出
38	转速初始位置 (送绝对编码器)
39	偏航起始位置 (送偏航编码器)
1	振动方向 X (来自振动加速度传感器)
2	振动方向 Y (来自振动加速度传感器)
3	风速 1
4	风速 2
5	风向 1
6	风向 2
7	液压系统压力 (电流信号)
8	液压转子刹车压力 (电流信号)
9	转子转速 1 (0—10V 模拟信号)
10	转子转速 2 (0—10V 模拟信号)
11	发电机转速
13	齿轮箱润滑过滤器入口压力
14	齿轮箱润滑过滤器出口压力 (可能没有)
15	转子状态 (来自光电编码器)
16	偏航状态 (来自光电编码器)
17	机舱柜温度
18	机舱温度
19	转子轴承发电机侧温度
20	转子轴承齿轮箱侧温度
21	齿轮箱轴 1 温度
22	齿轮箱轴 2 温度
23	齿轮箱油入口温度
24	齿轮箱油温度
25	发电机温度 U1
26	发电机温度 U2
27	发电机温度 V1
28	发电机温度 V2
29	发电机温度 W1

[0099]	30	发电机温度 W2
	31	发电机冷却空气温度
	32	发电机轴承温度
	33	发电机轴承温度
	34	发电机冷却空气温度
	35	机舱外温度
	36	液压油温度

[0100] 表3

[0101] 总之,通过UDP通信、POFIBUS现场总线通信、DMA数据交换、I/O端口交换等多种技术手段,实现了仿真模型与真实的物理控制设备间的高速无缝连接,达到了整个仿真控制平台的高速实时在线协调运行的技术要求。

[0102] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明。例如,本发明所述的计算机仿真系统所对应风电机组的主要技术参数如下:仿真对象机型:1500kW双馈型风电机组;发电机参数:极对数(对)=2;额定功率(W)=1550;额定转速(rpm)=1750;电网频率(Hz)=50;风力机参数:风轮半径(m)=43;轮毂半径(m)=1.0;叶片数=3;切入风速(m/s)=3.0;切出风速(m/s)=25;额定风速(m/s)=10.4;风轮额定转速(rpm)=17.4;Cpmax=0.49;变频器参数:额定功率(W)=1600kVA;直流环节电压(V)=980V;开关频率(Hz)=3kHz;额定扭矩(Nm)=8760;齿轮箱变比=100.48。

[0103] 本发明所述的风电机组仿真系统40所对应风电机组的部分仿真界面如图7所示。总之,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

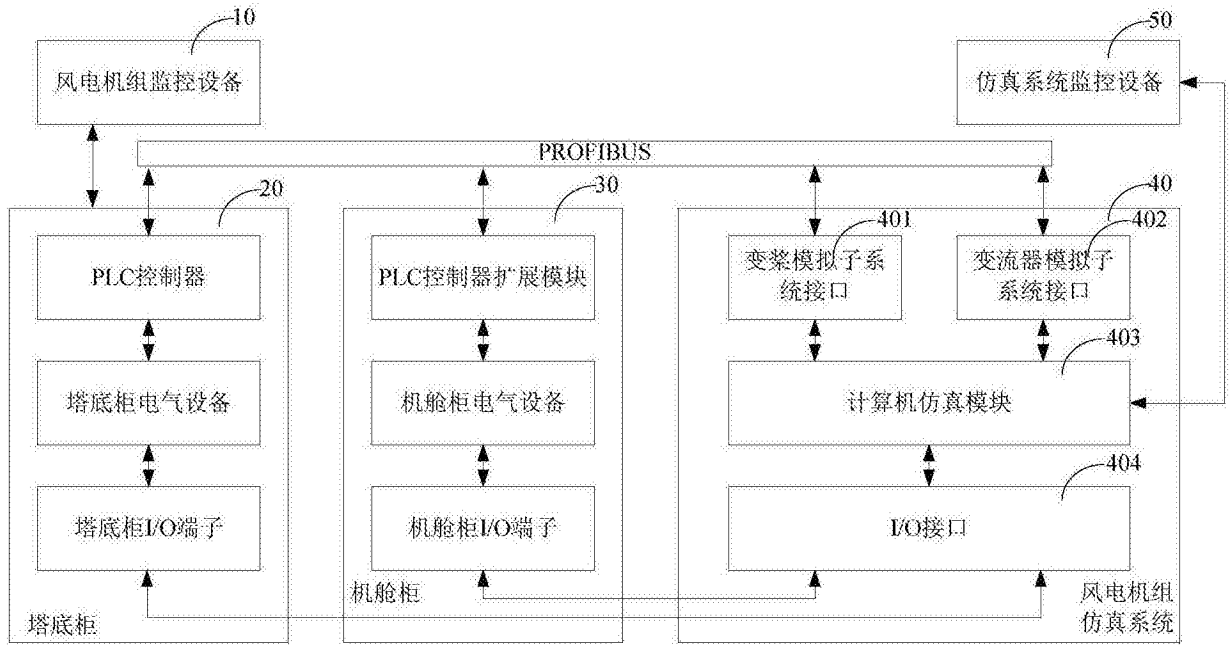


图1

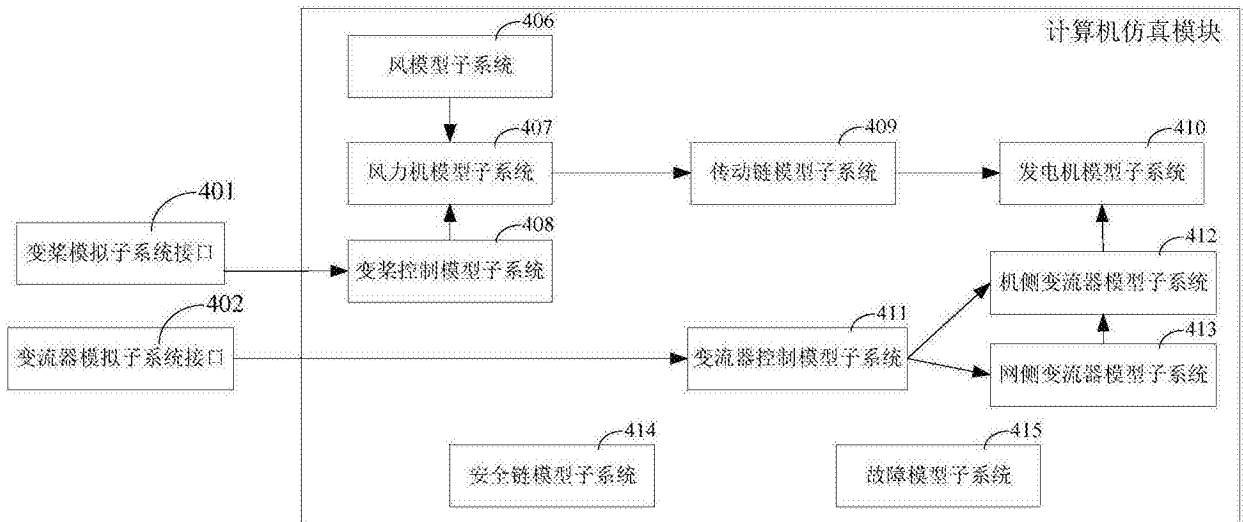


图2

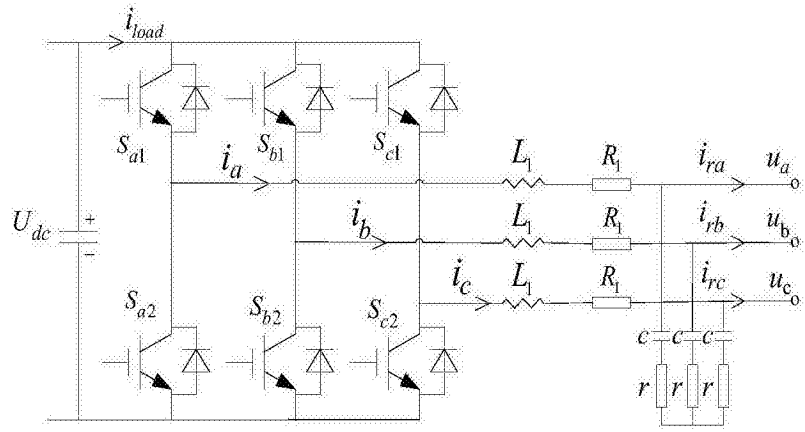


图3

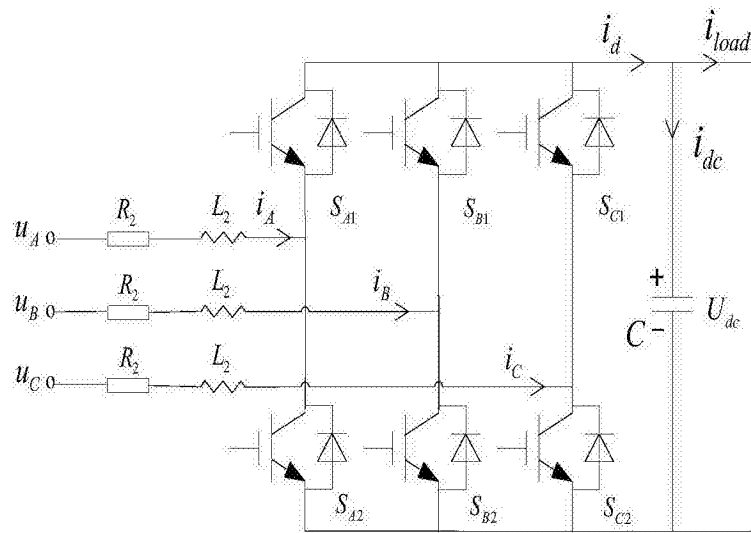


图4

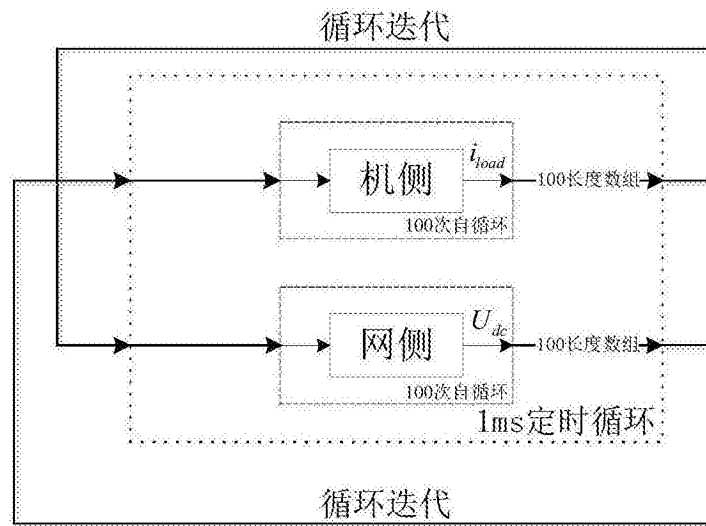


图5

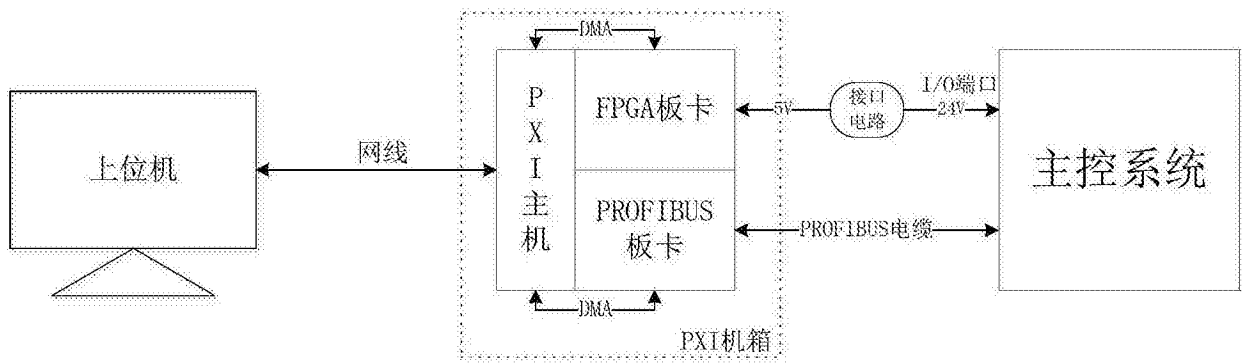


图6

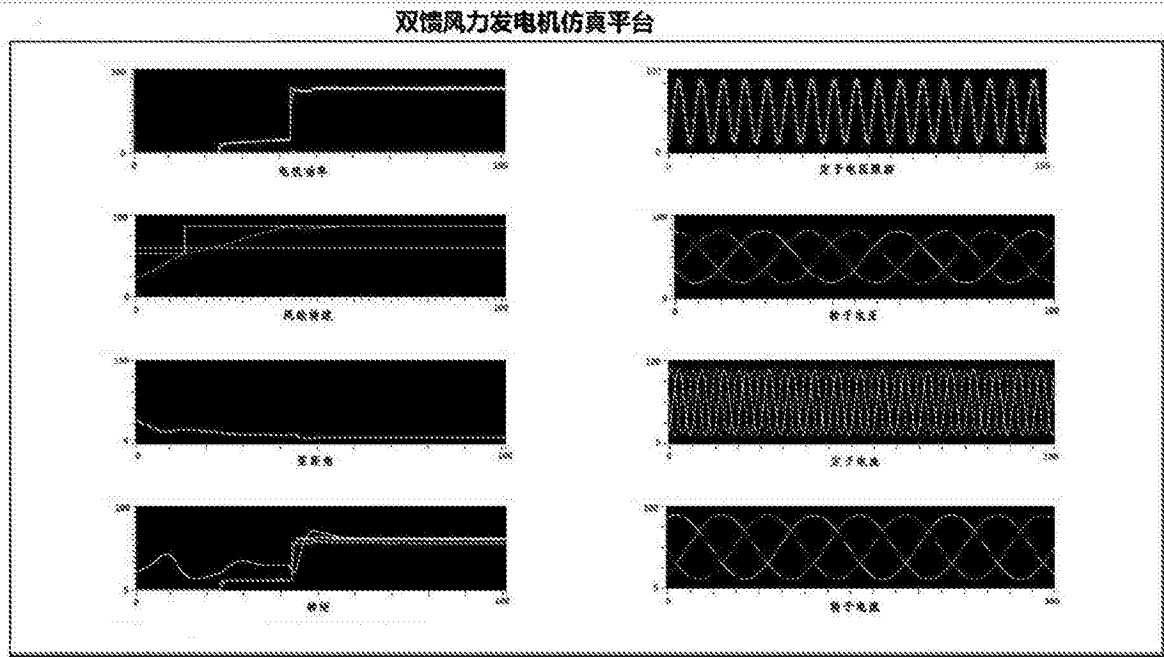


图7