



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 118211552 B

(45) 授权公告日 2024. 09. 03

(21) 申请号 202410619739.4

G06F 30/373 (2020.01)

(22) 申请日 2024.05.20

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 107169244 A, 2017.09.15

申请公布号 CN 118211552 A

WO 2016188503 A2, 2016.12.01

(43) 申请公布日 2024.06.18

审查员 郑岩

(73) 专利权人 山东大学

地址 250000 山东省济南市历下区经十路
17923号(72) 发明人 赵浩然 赵长旺 李冰 江艺宝
于佳乐 渠悦意(74) 专利代理机构 济南舜源专利事务有限公
司 37205

专利代理师 李少俊

(51) Int. Cl.

G06F 30/367 (2020.01)

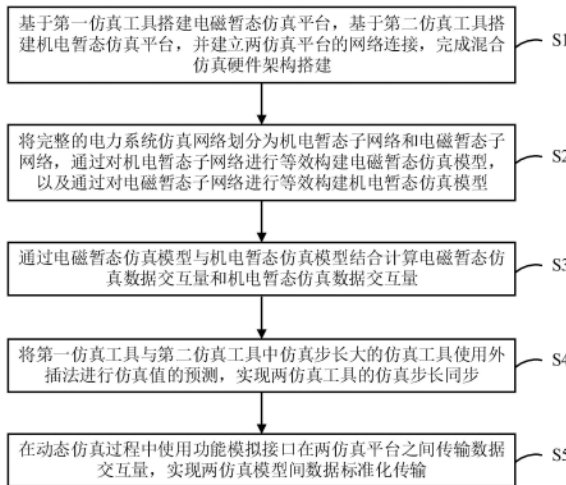
权利要求书4页 说明书11页 附图4页

(54) 发明名称

一种电磁与机电实时混合仿真方法及装置

(57) 摘要

本发明提供一种电磁与机电实时混合仿真方法及装置,属于电力系统仿真技术领域,所述方法步骤如下:搭建电磁暂态仿真平台和机电暂态仿真平台,并建立两仿真平台的网络连接;将完整的电力系统仿真网络划分为机电暂态子网络和电磁暂态子网络,并对两暂态子网络进行等效得到两仿真模型;通过两仿真模型结合计算数据交互量;使用外插法对仿真步长大的仿真工具进行仿真值预测,实现两仿真工具的仿真步长同步;在动态仿真过程中使用功能模拟接口在两仿真平台之间传输数据交互量。本发明实现电磁与机电混合仿真模型的实时仿真,仿真效率高,并能弥补两仿真工具的步长差距,混合仿真稳定性高,避免浪费计算资源,导出标准化文件实现混合仿真的通用性。



1. 一种电磁与机电实时混合仿真方法,其特征在于,包括如下步骤:

S1. 基于第一仿真工具搭建电磁暂态仿真平台,基于第二仿真工具搭建机电暂态仿真平台,并建立两仿真平台的网络连接,完成混合仿真硬件架构搭建;步骤S1具体步骤如下:

S11. 在RTLAB仿真机上使用第一仿真工具RTLAB搭建电磁暂态仿真平台;

S12. 在Windows测试机上使用第二仿真工具PowerFactory搭建机电暂态仿真平台,其中,第一仿真工具RTLAB的仿真步长小于第二仿真工具PowerFactory的仿真步长,且两者的差值大于设定阈值;

S13. 建立电磁暂态仿真平台与机电暂态仿真平台之间的网络连接,并设定两仿真平台使用UDP通信协议进行通信;

S2. 将完整的电力系统仿真网络划分为机电暂态子网络和电磁暂态子网络,通过对机电暂态子网络进行等效构建电磁暂态仿真模型,以及通过对电磁暂态子网络进行等效构建机电暂态仿真模型;

S3. 通过电磁暂态仿真模型与机电暂态仿真模型结合计算电磁暂态仿真数据交互量和机电暂态仿真数据交互量;步骤S3中包括如下步骤:

S31. 对电磁暂态仿真模型中机电侧进行电路等效,引入频率相关网络等值导纳 $Y(s)$ 和第一电流源的电流 I_E ,得到电磁暂态仿真模型的图形化展示;

S4. 将第一仿真工具与第二仿真工具中仿真步长大的仿真工具使用外插法进行仿真值的预测,实现两仿真工具的仿真步长同步;步骤S4具体步骤如下:

S41. 获取第二仿真工具PowerFactory的仿真步长,记作 ΔT ;

S42. 获取第一仿真工具RTLAB的仿真步长,记作 Δt ;

S43. 计算第二仿真工具PowerFactory与第一仿真工具RTLAB的仿真步长的比值 $M = \frac{\Delta T}{\Delta t}$;

S44. 基于仿真步长的比值 $M = \frac{\Delta T}{\Delta t}$ 使用外插法计算电磁暂态仿真模型中机电侧的第一电流源的电流 I_E 的预测值,并将预测值作为机电暂态仿真数据交互量传递给电磁暂态仿真模型,实现两仿真模型的仿真步长同步;

S5. 在动态仿真过程中使用功能模拟接口在两仿真平台之间传输数据交互量,实现两仿真模型间数据标准化传输。

2. 如权利要求1所述的电磁与机电实时混合仿真方法,其特征在于,步骤S2具体步骤如下:

S21. 根据仿真精度要求,将完整的电力系统仿真网络划分为机电暂态子网络和电磁暂态子网络;

S22. 通过对机电暂态子网络等效的方式进行电磁暂态仿真,并将机电侧等效后的模型与电磁暂态子网络作为电磁暂态仿真模型;

S23. 通过对电磁暂态子网络进行等效的方式进行机电暂态仿真,并将电磁侧等效后的模型与机电暂态子网络作为机电暂态仿真模型。

3. 如权利要求2所述的电磁与机电实时混合仿真方法,其特征在于,步骤S22具体步骤如下:

S221. 使用频率相关网络等值导纳代替传统诺顿等效电路中基频导纳值,完成诺顿等效电路改造;

S222. 使用改造后诺顿等效电路进行机电暂态子网络等效,得到机电侧等效后的模型;

S223. 将机电侧等效后的模型与电磁暂态子网络作为电磁暂态仿真模型,并导入第一仿真工具RTLAB搭建电磁暂态仿真平台中;

步骤S23具体步骤如下:

S231. 读取两仿真平台接口位置的功率和电压;

S232. 设置一个相同功率的恒定电流源进行电磁暂态子网络等效,得到电磁场等效后的模型;

S233. 将电磁侧等效后的模型与机电暂态子网络作为机电暂态仿真模型,并导入第二仿真工具PowerFactory搭建的机电暂态仿真平台中。

4. 如权利要求2所述的电磁与机电实时混合仿真方法,其特征在于,步骤S3还包括如下步骤:

S32. 将机电暂态仿真模型中机电暂态子网络使用诺顿等值电路表示,引入假想导纳 Y_0 和假想电流源的电流 I_R ,将电磁暂态子网络的等值电流源的电流表示为 I_s ,得到机电暂态仿真模型的图形化展示;

S33. 在电磁暂态仿真模型的仿真过程中根据机电侧的第一电流源的电流 I_E 计算出电磁暂态子网络的等值电流 I_s ,并将电磁暂态子网络的等值电流 I_s 作为第一交互量传递给机电暂态仿真模型,第一交互量为电磁暂态仿真数据交互量;

S34. 在机电暂态仿真模型的仿真过程中根据第一交互量计算第二交互量,并将第二交互量传递给电磁暂态仿真模型,即根据电磁暂态子网络的等值电流 I_s 计算假想电流源的电流 I_R ,验证得到假想电流源的电流 I_R 与第一电流源的电流 I_E 相等,第二交互量为机电暂态仿真数据交互量。

5. 如权利要求4所述的电磁与机电实时混合仿真方法,其特征在于,步骤S5具体步骤如下:

S51. 将机电暂态仿真模型在第二仿真工具PowerFactory上封装成符合FMI标准的FMU文件;

S52. 在Windows测试机上导出FMU文件,并通过通用脚本文件调用FMU文件进行第一仿真工具RTLAB与第二仿真工具PowerFactory之间的通信,在电磁暂态仿真模型与机电暂态仿真模型之间进行数据交互量的标准化传输,实现动态仿真。

6. 如权利要求5所述的电磁与机电实时混合仿真方法,其特征在于,步骤S52中在Windows测试机上导出FMU文件之前需要通过如下步骤进行机电暂态仿真模型的配置:

添加DLS模型,并选择DLS模型的类型为编译模型;

设置适配FMI标准的动态链接库文件;

定义DLS模型的输入量为电磁暂态子网络的等值电流 I_s ,输出量为第一电流源的电流

I_E ,从而将DLS模型配置为机电暂态仿真模型。

7.一种电磁与机电实时混合仿真装置,其特征在于,包括:

仿真架构硬件搭建模块,用于基于第一仿真工具搭建电磁暂态仿真平台,基于第二仿真工具搭建机电暂态仿真平台,并建立两仿真平台的网络连接,完成混合仿真硬件架构搭建;仿真架构硬件搭建模块包括:

电磁暂态仿真平台搭建单元,用于在RTLAB仿真机上使用第一仿真工具RTLAB搭建电磁暂态仿真平台;

机电暂态仿真平台搭建单元,用于在Windows测试机上使用第二仿真工具PowerFactory搭建机电暂态仿真平台,其中,第一仿真工具RTLAB的仿真步长小于第二仿真工具PowerFactory的仿真步长,且两者的差值大于设定阈值;

网络连接单元,用于建立电磁暂态仿真平台与机电暂态仿真平台之间的网络连接,并设定两仿真平台使用UDP通信协议进行通信;

仿真网络划分模块,用于将完整的电力系统仿真网络划分为机电暂态子网络和电磁暂态子网络,通过对机电暂态子网络进行等效构建电磁暂态仿真模型,以及通过对电磁暂态子网络进行等效构建机电暂态仿真模型;

数据交互量计算模块,用于通过电磁暂态仿真模型与机电暂态仿真模型结合计算电磁暂态仿真数据交互量和机电暂态仿真数据交互量;数据交互量计算模块包括:

电磁暂态仿真模型图形化单元,用于对电磁暂态仿真模型中机电侧进行电路等效,引入频率相关网络等值导纳 $Y(s)$ 和第一电流源的电流 I_E ,得到电磁暂态仿真模型的图形化展示;

外插数据交互模块,用于将第一仿真工具与第二仿真工具中仿真步长大的仿真工具使用外插法进行仿真值的预测,实现两仿真工具的仿真步长同步;外插数据交互模块包括:

第二仿真步长获取单元,用于获取第二仿真工具PowerFactory的仿真步长,记作 ΔT ;

第一仿真步长获取单元,用于获取第一仿真工具RTLAB的仿真步长,记作 Δt ;

步长比值计算单元,用于计算第二仿真工具PowerFactory与第一仿真工具RTLAB的仿真步长的比值 $M = \frac{\Delta T}{\Delta t}$;

外插法仿真值预测单元,用于基于仿真步长的比值 $M = \frac{\Delta T}{\Delta t}$ 使用外插法计算电磁暂态仿真模型中机电侧的第一电流源的电流 I_E 的预测值,并将预测值作为机电暂态仿真数据交互量传递给电磁暂态仿真模型,实现两仿真模型的仿真步长同步;

标准化传输模块,用于在动态仿真过程中使用功能模拟接口在两仿真平台之间传输数据交互量,实现两仿真模型间数据标准化传输。

8.如权利要求7所述的电磁与机电实时混合仿真装置,其特征在于,

仿真网络划分模块包括:

网络划分单元,用于根据仿真精度要求,将完整的电力系统仿真网络划分为机电暂态子网络和电磁暂态子网络;

机电暂态子网络等效单元,用于通过对机电暂态子网络等效的方式进行电磁暂态仿

真,并将机电侧等效后的模型与电磁暂态子网络作为电磁暂态仿真模型;

电磁暂态子网络等效单元,用于通过对电磁暂态子网络进行等效的方式进行机电暂态仿真,并将电磁侧等效后的模型与机电暂态子网络作为机电暂态仿真模型;

数据交互量计算模块还包括:

机电暂态仿真模型图形化单元,用于将机电暂态仿真模型中机电暂态子网络使用诺顿等值电路表示,引入假想导纳 Y_0 和假想电流源的电流 I_R ,将电磁暂态子网络的等值电流源的电流表示为 I_S ,得到机电暂态仿真模型的图形化展示;

第一交互量计算单元,用于在电磁暂态仿真模型的仿真过程中根据机电侧的第一电流源的电流 I_E 计算出电磁暂态子网络的等值电流 I_S ,并将电磁暂态子网络的等值电流 I_S 作为第一交互量传递给机电暂态仿真模型,第一交互量为电磁暂态仿真数据交互量;

第二交互量计算单元,在机电暂态仿真模型的仿真过程中根据第一交互量计算第二交互量,并将第二交互量传递给电磁暂态仿真模型,即根据电磁暂态子网络的等值电流 I_S 计算假想电流源的电流 I_R ,验证得到假想电流源的电流 I_R 与第一电流源的电流 I_E 相等,第二交互量为机电暂态仿真数据交互量;

标准化传输模块包括:

FMU文件生成单元,用于将机电暂态仿真模型在第二仿真工具PowerFactory上封装成符合FMI标准的FMU文件;

FMU文件导出单元,用于在Windows测试机上导出FMU文件,并通过通用脚本文件调用FMU文件进行第一仿真工具RTLAB与第二仿真工具PowerFactory之间的通信,在电磁暂态仿真模型与机电暂态仿真模型之间进行数据交互量的标准化传输,实现动态仿真。

一种电磁与机电实时混合仿真方法及装置

技术领域

[0001] 本发明属于电力系统仿真技术领域,具体涉及一种电磁与机电实时混合仿真方法及装置。

背景技术

[0002] 电力系统数字仿真能够准确模拟电力系统的运行状态,辅助工程师进行系统规划设计、故障分析,因此在电力系统中得到广泛应用。随着电网规模的不断扩大,电力系统越来越复杂化,尤其是随着风电、光伏等新能源规模及渗透率的增加,电力系统呈现出高比例电子特征,如何对新兴电力系统进行快速精确的仿真,已成为一个重要的研究方向。按照所分析动态响应内容的不同,电力系统仿真可分为电磁暂态仿真和机电暂态仿真两类。电磁暂态仿真建模精确,但仿真规模小,仿真慢。而机电暂态仿真则仿真速度快,仿真规模大,但仿真精度不够高。鉴于传统单一的电磁暂态仿真或机电暂态仿真很难全面描绘现代电网的复杂特性,通常应用电磁-机电混合仿真技术对现代电网进行高精度、高效率的仿真。

[0003] 电磁-机电混合仿真能够充分结合电磁暂态仿真和机电暂态仿真的优点,实现对仿真的速度、精度和规模的综合考量。当前许多科技机构、高校和企业都已开始对电磁-机电混合仿真平台的研究,例如某高校研发的基于频率相关网络等值的电磁-机电暂态解耦混合仿真平台,该平台基于仿真支持模块和管道通信模块在PSCAD/EMTDC和EWSC上实现了电磁-机电暂态混合仿真,并在仿真过程中引入了仿真支持模块和管道通信模块。但此方式存在如下缺点:一是EWSC程序属于暂态稳定预警与预防控制的分析软件,算力低计算资源较少,无法实现实时仿真,同时面对较大规模系统时会出现计算效率低等问题。二是机电暂态仿真步长往往是电磁暂态仿真步长的几百倍,因此机电暂态仿真程序进行一个仿真步长的计算,电磁暂态仿真程序往往是电磁暂态仿真步长的几百倍。受限于混合仿真大步长的交互周期,电磁暂态仿真程序无法获取机电网络实时的计算结果,因此这几百次计算均使用相同的初始数据,浪费了计算资源。三是仿真过程中引入的仿真支持模块和管道通信模块都是专用的,仅针对PSCAD/EMTDC和EWSC混合仿真框架,不支持用户将该仿真方案复刻到其他仿真平台上,限制了混合仿真的发展,通用性较差。

[0004] 此为现有技术的不足,因此,针对现有技术中的上述缺陷,提供一种电磁与机电实时混合仿真方法及装置,是非常有必要的。

发明内容

[0005] 电力系统数字仿真可模拟电力系统的运行状态,因此在电力系统中得到了广泛应用,传统的电磁暂态仿真和机电暂态仿真均存在缺点,基于两者混合仿真可对电网进行高精度和高效率的仿真,但现有的混合仿真方式存在算力资源低,无法实时仿真,步长不一致,小步长的仿真重复进行相同的计算,浪费计算资源,以及兼容通用性低的缺陷,本发明提供一种电磁与机电实时混合仿真方法及装置,以解决上述技术问题。

[0006] 第一方面,本发明提供一种电磁与机电实时混合仿真方法,包括如下步骤:

[0007] S1.基于第一仿真工具搭建电磁暂态仿真平台,基于第二仿真工具搭建机电暂态仿真平台,并建立两仿真平台的网络连接,完成混合仿真硬件架构搭建;

[0008] S2.将完整的电力系统仿真网络划分为机电暂态子网络和电磁暂态子网络,通过对机电暂态子网络进行等效构建电磁暂态仿真模型,以及通过对电磁暂态子网络进行等效构建机电暂态仿真模型;

[0009] S3.通过电磁暂态仿真模型与机电暂态仿真模型结合计算电磁暂态仿真数据交互量和机电暂态仿真数据交互量;

[0010] S4.将第一仿真工具与第二仿真工具中仿真步长大的仿真工具使用外插法进行仿真值的预测,实现两仿真工具的仿真步长同步;

[0011] S5.在动态仿真过程中使用功能模拟接口在两仿真平台之间传输数据交互量,实现两仿真模型间数据标准化传输。

[0012] 进一步地,步骤S1具体步骤如下:

[0013] S11.在RTLAB仿真机上使用第一仿真工具RTLAB搭建电磁暂态仿真平台;

[0014] S12.在Windows测试机上使用第二仿真工具PowerFactory搭建机电暂态仿真平台,其中,第一仿真工具RTLAB的仿真步长小于第二仿真工具PowerFactory的仿真步长,且两者的差值大于设定阈值;

[0015] S13.建立电磁暂态仿真平台与机电暂态仿真平台之间的网络连接,并设定两仿真平台使用UDP通信协议进行通信。

[0016] 进一步地,步骤S2具体步骤如下:

[0017] S21.根据仿真精度要求,将完整的电力系统仿真网络划分为机电暂态子网络和电磁暂态子网络;

[0018] S22.通过对机电暂态子网络等效的方式进行电磁暂态仿真,并将机电侧等效后的模型与电磁暂态子网络作为电磁暂态仿真模型;

[0019] S23.通过对电磁暂态子网络进行等效的方式进行机电暂态仿真,并将电磁侧等效后的模型与机电暂态子网络作为机电暂态仿真模型。

[0020] 进一步地,步骤S22具体步骤如下:

[0021] S221.使用频率相关网络等值导纳代替传统诺顿等效电路中基频导纳值,完成诺顿等效电路改造;

[0022] S222.使用改造后诺顿等效电路进行机电暂态子网络等效,得到机电侧等效后的模型;

[0023] S223.将机电侧等效后的模型与电磁暂态子网络作为电磁暂态仿真模型,并导入第一仿真工具RTLAB搭建电磁暂态仿真平台中;

[0024] 步骤S23具体步骤如下:

[0025] S231.读取两仿真平台接口位置的功率和电压;

[0026] S232.设置一个相同功率的恒定电流源进行电磁暂态子网络等效,得到电磁场等效后的模型;

[0027] S233.将电磁侧等效后的模型与机电暂态子网络作为机电暂态仿真模型,并导入第二仿真工具PowerFactory搭建的机电暂态仿真平台中。

[0028] 进一步地,步骤S3具体步骤如下:

[0029] S31.对电磁暂态仿真模型中机电侧进行电路等效,引入频率相关网络等值导纳 $Y(s)$ 和第一电流源的电流 I_E ,得到电磁暂态仿真模型的图形化展示;

[0030] S32.将机电暂态仿真模型中机电暂态子网络使用诺顿等值电路表示,引入假想导纳 Y_0 和假想电流源的电流 I_R ,将电磁暂态子网络的等值电流源的电流表示为 I_s ,得到机电暂态仿真模型的图形化展示;

[0031] S33.在电磁暂态仿真模型的仿真过程中根据机电侧的第一电流源的电流 I_E 计算出电磁暂态子网络的等值电流 I_s ,并将电磁暂态子网络的等值电流 I_s 作为第一交互量传递给机电暂态仿真模型,第一交互量为电磁暂态仿真数据交互量;

[0032] S34.在机电暂态仿真模型的仿真过程中根据第一交互量计算第二交互量,并将第二交互量传递给电磁暂态仿真模型,即根据电磁暂态子网络的等值电流 I_s 计算假想电流源的电流 I_R ,验证得到假想电流源的电流 I_R 与第一电流源的电流 I_E 相等,第二交互量为机电暂态仿真数据交互量。

[0033] 进一步地,步骤S4具体步骤如下:

[0034] S41.获取第二仿真工具PowerFactory的仿真步长,记作 ΔT ;

[0035] S42.获取第一仿真工具RTLAB的仿真步长,记作 Δt ;

[0036] S43.计算第二仿真工具PowerFactory与第一仿真工具RTLAB的仿真步长的比值 $M = \frac{\Delta T}{\Delta t}$;

[0037] S44.基于仿真步长的比值 $M = \frac{\Delta T}{\Delta t}$ 使用外插法计算电磁暂态仿真模型中机电侧的第一电流源的电流 I_E 的预测值,并将预测值作为机电暂态仿真数据交互量传递给电磁暂态仿真模型,实现两仿真模型的仿真步长同步。

[0038] 进一步地,步骤S5具体步骤如下:

[0039] S51.将机电暂态仿真模型在第二仿真工具PowerFactory上封装成符合FMI标准的FMU文件;

[0040] S52.在Windows测试机上导出FMU文件,并通过通用脚本文件调用FMU文件进行第一仿真工具RTLAB与第二仿真工具PowerFactory之间的通信,在电磁暂态仿真模型与机电暂态仿真模型之间进行数据交互量的标准化传输,实现动态仿真。

[0041] 进一步地,步骤S52中在Windows测试机上导出FMU文件之前需要通过如下步骤进行机电暂态仿真模型的配置:

[0042] 添加DLS模型,并选择DLS模型的类型为编译模型;

[0043] 设置适配FMI标准的动态链接库文件;

[0044] 定义DLS模型的输入量为电磁暂态子网络的等值电流 I_s ,输出量为第一电流源的电流 I_E ,从而将DLS模型配置为机电暂态仿真模型。

[0045] 第二方面,本发明提供一种电磁与机电实时混合仿真装置,包括:

[0046] 仿真架构硬件搭建模块,用于基于第一仿真工具搭建电磁暂态仿真平台,基于第

二仿真工具搭建机电暂态仿真平台,并建立两仿真平台的网络连接,完成混合仿真硬件架构搭建;

[0047] 仿真网络划分模块,用于将完整的电力系统仿真网络划分为机电暂态子网络和电磁暂态子网络,通过对机电暂态子网络进行等效构建电磁暂态仿真模型,以及通过对电磁暂态子网络进行等效构建机电暂态仿真模型;

[0048] 数据交互量计算模块,用于通过电磁暂态仿真模型与机电暂态仿真模型结合计算电磁暂态仿真数据交互量和机电暂态仿真数据交互量;

[0049] 外插数据交互模块,用于将第一仿真工具与第二仿真工具中仿真步长大的仿真工具使用外插法进行仿真值的预测,实现两仿真工具的仿真步长同步;

[0050] 标准化传输模块,用于在动态仿真过程中使用功能模拟接口在两仿真平台之间传输数据交互量,实现两仿真模型间数据标准化传输。

[0051] 进一步地,仿真架构硬件搭建模块包括:

[0052] 电磁暂态仿真平台搭建单元,用于在RTLAB仿真机上使用第一仿真工具RTLAB搭建电磁暂态仿真平台;

[0053] 机电暂态仿真平台搭建单元,用于在Windows测试机上使用第二仿真工具PowerFactory搭建机电暂态仿真平台,其中,第一仿真工具RTLAB的仿真步长小于第二仿真工具PowerFactory的仿真步长,且两者的差值大于设定阈值;

[0054] 网络连接单元,用于建立电磁暂态仿真平台与机电暂态仿真平台之间的网络连接,并设定两仿真平台使用UDP通信协议进行通信;

[0055] 仿真网络划分模块包括:

[0056] 网络划分单元,用于根据仿真精度要求,将完整的电力系统仿真网络划分为机电暂态子网络和电磁暂态子网络;

[0057] 机电暂态子网络等效单元,用于通过对机电暂态子网络等效的方式进行电磁暂态仿真,并将机电侧等效后的模型与电磁暂态子网络作为电磁暂态仿真模型;

[0058] 电磁暂态子网络等效单元,用于通过对电磁暂态子网络进行等效的方式进行机电暂态仿真,并将电磁侧等效后的模型与机电暂态子网络作为机电暂态仿真模型;

[0059] 数据交互量计算模块包括:

[0060] 电磁暂态仿真模型图形化单元,用于对电磁暂态仿真模型中机电侧进行电路等效,引入频率相关网络等值导纳 $\mathbf{Y}(s)$ 和第一电流源的电流 I_E ,得到电磁暂态仿真模型的图形化展示;

[0061] 机电暂态仿真模型图形化单元,用于将机电暂态仿真模型中机电暂态子网络使用诺顿等值电路表示,引入假想导纳 Y_0 和假想电流源的电流 I_R ,将电磁暂态子网络的等值电流源的电流表示为 I_s ,得到机电暂态仿真模型的图形化展示;

[0062] 第一交互量计算单元,用于在电磁暂态仿真模型的仿真过程中根据机电侧的第一电流源的电流 I_E 计算出电磁暂态子网络的等值电流 I_s ,并将电磁暂态子网络的等值电流 I_s 作为第一交互量传递给机电暂态仿真模型,第一交互量为电磁暂态仿真数据交互量;

[0063] 第二交互量计算单元,在机电暂态仿真模型的仿真过程中根据第一交互量计算第

二交互量,并将第二交互量传递给电磁暂态仿真模型,即根据电磁暂态子网络的等值电流 I_s 计算假想电流源的电流 I_R ,验证得到假想电流源的电流 I_R 与第一电流源的电流 I_E 相等,第二交互量为机电暂态仿真数据交互量;

[0064] 外插数据交互模块包括:

[0065] 第二仿真步长获取单元,用于获取第二仿真工具PowerFactory的仿真步长,记作 ΔT ;

[0066] 第一仿真步长获取单元,用于获取第一仿真工具RTLAB的仿真步长,记作 Δt ;

[0067] 步长比值计算单元,用于计算第二仿真工具PowerFactory与第一仿真工具RTLAB的仿真步长的比值 $M = \frac{\Delta T}{\Delta t}$;

[0068] 外插法仿真值预测单元,用于基于仿真步长的比值 $M = \frac{\Delta T}{\Delta t}$ 使用外插法计算电磁暂态仿真模型中机电侧的第一电流源的电流 I_E 的预测值,并将预测值作为机电暂态仿真数据交互量传递给电磁暂态仿真模型,实现两仿真模型的仿真步长同步;

[0069] 标准化传输模块包括:

[0070] FMU文件生成单元,用于将机电暂态仿真模型在第二仿真工具PowerFactory上封装成符合FMI标准的FMU文件;

[0071] FMU文件导出单元,用于在Windows测试机上导出FMU文件,并通过通用脚本文件调用FMU文件进行第一仿真工具RTLAB与第二仿真工具PowerFactory之间的通信,在电磁暂态仿真模型与机电暂态仿真模型之间进行数据交互量的标准化传输,实现动态仿真。

[0072] 本发明的有益效果在于:

[0073] 本发明提供的电磁与机电实时混合仿真方法及装置,通过RTLAB仿真工具和PowerFactory仿真工具结合实现仿真模型的大规模的实时仿真,仿真效率低;通过外插法进行数据交互量的预测来弥补两种仿真工具的仿真步长的差距,提高混合仿真的稳定性和收敛速度,避免电磁暂态仿真过程中计算资源的浪费;通过将PowerFactory仿真工具的机电暂态仿真模型导出为符合FMI标准的FMU文件,通过调用FMU文件的方式实现两仿真工具间通信的通用性。

[0074] 此外,本发明设计原理可靠,结构简单,具有非常广泛的应用前景。

[0075] 由此可见,本发明与现有技术相比,具有突出的实质性特点和显著的进步,其实施的有益效果也是显而易见的。

附图说明

[0076] 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,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,对于本领域普通技术人员而言,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。

[0077] 图1是本发明的电磁与机电实时混合仿真方法的流程示意图。

[0078] 图2是本发明的电磁与机电实时混合仿真装置示意图。

[0079] 图3是本发明的混合仿真整体架构示意图。

- [0080] 图4是本发明的仿真网络划分子网示意图。
- [0081] 图5是本发明的电磁暂态仿真模型示意图。
- [0082] 图6是本发明的机电暂态仿真模型示意图。
- [0083] 图7是本发明的电磁暂态仿真模型的等效电路图。
- [0084] 图8是本发明的机电暂态仿真模型的等效电路图。

具体实施方式

[0085] 本发明提供的电磁与机电实时混合仿真方法及装置,基于现有主流仿真软件RTLAB和PowerFactory,利用功能模型接口FMI标准。首先,基于频率相关网络等值法FDNE对电磁暂态子网络和机电暂态子网络分别进行等值建模,得到各自完整的电磁暂态仿真模型和机电暂态仿真模型;其次,定义模型间的数据交互信息,给出数据交互量的计算公式,并设计了一种大步长数据外插法来实现模型间数据交互;再次,将完整的电磁暂态仿真模型导入RTLAB仿真机中,将完整的机电暂态仿真模型在PowerFactory上封装成符合FMI标准的FMU文件。最后,将Windows主机与RTLAB仿真机通过网线相连,在Windows主机上利用编写的C++软件调用FMU文件,基于UDP通信实现RTLAB与PowerFactory之间的电力系统实时混合仿真。

[0086] 为了使本技术领域的人员更好地理解本发明中的技术方案,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,都应当属于本发明保护的范围。

[0087] 请参阅图1所示是一具体实施中电磁与机电实时混合仿真方法,包括如下步骤:

[0088] S1.基于第一仿真工具搭建电磁暂态仿真平台,基于第二仿真工具搭建机电暂态仿真平台,并建立两仿真平台的网络连接,完成混合仿真硬件架构搭建;

[0089] S2.将完整的电力系统仿真网络划分为机电暂态子网络和电磁暂态子网络,通过对机电暂态子网络进行等效构建电磁暂态仿真模型,以及通过对电磁暂态子网络进行等效构建机电暂态仿真模型;

[0090] S3.通过电磁暂态仿真模型与机电暂态仿真模型结合计算电磁暂态仿真数据交互量和机电暂态仿真数据交互量;

[0091] S4.将第一仿真工具与第二仿真工具中仿真步长大的仿真工具使用外插法进行仿真值的预测,实现两仿真工具的仿真步长同步;

[0092] S5.在动态仿真过程中使用功能模拟接口在两仿真平台之间传输数据交互量,实现两仿真模型间数据标准化传输。

[0093] 本实施例中,步骤S1具体步骤如下:

[0094] S11.在RTLAB仿真机上使用第一仿真工具RTLAB搭建电磁暂态仿真平台;

[0095] RTLAB仿真工具与MATLAB/Simulink紧密结合,可以直接用于将MATLAB/Simulink中建立的模型导入进行实时仿真和控制;RTLAB由于方便性、灵活性和开放性,可适用于各种工程系统仿真和控制场景,已广泛应用于电力系统、电机拖动和电力电子等领域;

[0096] S12.在Windows测试机上使用第二仿真工具PowerFactory搭建机电暂态仿真平

台,其中,第一仿真工具RTLAB的仿真步长小于第二仿真工具PowerFactory的仿真步长,且两者的差值大于设定阈值;

[0097] PowerFactory作为大型电力系统综合仿真软件,采用基于Windows标准的操作模型和图模一体化的处理方式,拥有丰富的电力系统元件模型库,包括发电机、电动机、控制器、动态负荷、线路、变压器、并联设备等;

[0098] S13.建立电磁暂态仿真平台与机电暂态仿真平台之间的网络连接,并设定两仿真平台使用UDP通信协议进行通信;

[0099] 通过步骤S1的执行,实现如图3所示的混合仿真整体架构搭建;

[0100] 步骤S2具体步骤如下:

[0101] S21.根据仿真精度要求,将完整的电力系统仿真网络划分为机电暂态子网络和电磁暂态子网络;

[0102] 通过步骤S21的执行得到如图4所示的仿真网络划分子网;

[0103] S22.通过对机电暂态子网络等效的方式进行电磁暂态仿真,并将机电侧等效后的模型与电磁暂态子网络作为电磁暂态仿真模型;步骤S22具体步骤如下:

[0104] S221.使用频率相关网络等值导纳代替传统诺顿等效电路中基频导纳值,完成诺顿等效电路改造;

[0105] S222.使用改造后诺顿等效电路进行机电暂态子网络等效,得到机电侧等效后的模型;

[0106] 通过步骤S222的执行得到如图5所示的电磁暂态仿真模型;

[0107] S223.将机电侧等效后的模型与电磁暂态子网络作为电磁暂态仿真模型,并导入第一仿真工具RTLAB搭建电磁暂态仿真平台中;

[0108] S23.通过对电磁暂态子网络进行等效的方式进行机电暂态仿真,并将电磁侧等效后的模型与机电暂态子网络作为机电暂态仿真模型;步骤S23具体步骤如下:

[0109] S231.读取两仿真平台接口位置的功率和电压;

[0110] S232.设置一个相同功率的恒定电流源进行电磁暂态子网络等效,得到电磁侧等效后的模型;

[0111] 通过步骤S232的执行得到如图6所示的机电暂态仿真模型;

[0112] S233.将电磁侧等效后的模型与机电暂态子网络作为机电暂态仿真模型,并导入第二仿真工具PowerFactory搭建的机电暂态仿真平台中;

[0113] 步骤S3具体步骤如下:

[0114] S31.对电磁暂态仿真模型中机电侧进行电路等效,引入频率相关网络等值导纳 $Y(s)$ 和第一电流源的电流 I_E ,得到电磁暂态仿真模型的图形化展示;

[0115] 通过步骤S31的执行得到如图7所示的电磁暂态仿真模型的等效电路图;

[0116] S32.将机电暂态仿真模型中机电暂态子网络使用诺顿等值电路表示,引入假想导纳 Y_0 和假想电流源的电流 I_R ,将电磁暂态子网络的等值电流源的电流表示为 I_s ,得到机电暂态仿真模型的图形化展示;

[0117] 通过步骤S32的执行得到如图8所示的电磁暂态仿真模型的等效电路图;

[0118] S33.在电磁暂态仿真模型的仿真过程中根据机电侧的第一电流源的电流 I_E 计算

出电磁暂态子网络的等值电流 I_s , 并将电磁暂态子网络的等值电流 I_s 作为第一交互量传递给机电暂态仿真模型, 第一交互量为电磁暂态仿真数据交互量;

[0119] S34. 在机电暂态仿真模型的仿真过程中根据第一交互量计算第二交互量, 并将第二交互量传递给电磁暂态仿真模型, 即根据电磁暂态子网络的等值电流 I_s 计算假想电流源的电流 I_R , 验证得到假想电流源的电流 I_R 与第一电流源的电流 I_E 相等, 第二交互量为机电暂态仿真数据交互量;

[0120] 图7中, $Y(s)$ 为频率相关网络等值导纳、 U_E 为 $Y(s)$ 两端的电压、 I_E 为诺顿等效电路中的电流源的电流、 P_E 和 Q_E 为网络注入诺顿电流源 I_E 的有功功率和无功功率; 图8中, I_s 为电磁暂态子网络的等值电流源的电流、 Y_0 为假想的诺顿等值网络中的导纳、 U_R 为 Y_0 两端的电压、 I_R 为假想的诺顿等值网络中的电流源的电流、 P_R 和 Q_R 为网络注入假想诺顿电流源 I_R 的有功功率和无功功率;

[0121] 电磁暂态仿真程序需要根据 I_E 计算出电磁暂态子网络的等效电流 (假想其在图7中存在), 即对应图8机电暂态仿真程序中的电流 I_s ; 设电流源 I_E 处的三相电压为 u_a 、 u_b 、 u_c , 三相电流为 i_a 、 i_b 、 i_c , 则网络提供给电流源 I_E 的功率可由公式计算得出:

$$[0122] \quad P_E = u_a \times i_a + u_b \times i_b + u_c \times i_c \quad (1)$$

$$[0123] \quad Q_E = \frac{(u_b - u_c) \times i_a + (u_c - u_a) \times i_b + (u_a - u_b) \times i_c}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

[0124] 映射到机电暂态仿真模型中有:

$$[0125] \quad P_R \approx \frac{P_E}{3} \quad (3)$$

$$[0126] \quad Q_R \approx \frac{Q_E}{3} \quad (4)$$

[0127] 则可推导出在电磁暂态仿真程序中计算电流源 I_s 的公式为:

$$[0128] \quad U_R = \frac{P_R + j \times Q_R}{I_R} \quad (5)$$

$$[0129] \quad I_s = Y_0 \times U_R + I_R \quad (6)$$

[0130] 机电暂态仿真过程中需要根据 I_s 计算出机电暂态子网络的等效电流 I_R , 并传到电磁暂态仿真程序中; I_R 在图7电磁暂态仿真程序中对应电流 I_E ; 容易推导出机电暂态仿真程序计算电流源 I_R 的公式为:

$$[0131] \quad I_R = I_s - U_R \times Y_0 \quad (7)$$

$$[0132] \quad I_E \approx I_R \quad (8)$$

[0133] 步骤S4具体步骤如下:

[0134] S41. 获取第二仿真工具PowerFactory的仿真步长, 记作 ΔT ;

[0135] S42.获取第一仿真工具RTLAB的仿真步长,记作 Δt ;

[0136] S43.计算第二仿真工具PowerFactory与第一仿真工具RTLAB的仿真步长的比值

$$M = \frac{\Delta T}{\Delta t};$$

[0137] S44.基于仿真步长的比值 $M = \frac{\Delta T}{\Delta t}$ 使用外插法计算电磁暂态仿真模型中机电侧的第一电流源的电流 I_E 的预测值,并将预测值作为机电暂态仿真数据交互量传递给电磁暂态仿真模型,实现两仿真模型的仿真步长同步;

[0138] 鉴于 M 的大小通常在几百左右,这就意味着机电暂态仿真程序进行一个仿真步长的计算,电磁暂态仿真程序将会执行数百次仿真步长的计算;受限于大步长的交互周期,电磁暂态仿真模型无法获取机电网络实时的计算结果,因此这几百次计算均使用相同的初始数据,浪费了计算资源;

[0139] 为此,基于外插法对该问题进行优化,即利用机电仿真模型执行中本次和上次的计算结果进行外插,从而获得变化的具有一定预测作用的电磁暂态仿真模型初始值;外插法的公式为:

$$[0140] \quad I_E^{M_i+j} = \begin{cases} I_E^{M_i} + \frac{j}{M} (I_E^{M_i} - I_E^{M(i-1)}) & 1 \leq j \leq M-1 \\ I_E^{M_i} & j = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$[0141] \quad \delta I_E^{M_i+j} = \begin{cases} \delta I_E^{M_i} + \frac{j}{M} (\delta I_E^{M_i} - \delta I_E^{M(i-1)}) & 1 \leq j \leq M-1 \\ \delta I_E^{M_i} & j = 0 \end{cases} \quad (10)$$

[0142] 其中, $I_E^{M_i}$ 为第 i 次机电仿真程序传输的电流幅值、 $I_E^{M(i-1)}$ 为第 $i-1$ 次机电仿真程序传输的电流幅值、 $\delta I_E^{M_i}$ 为第 i 次机电仿真程序传输的电流相角、 $\delta I_E^{M(i-1)}$ 为第 $i-1$ 次机电仿真程序传输的电流相角;

[0143] 步骤S5具体步骤如下:

[0144] S51.将机电暂态仿真模型在第二仿真工具PowerFactory上封装成符合FMI标准的FMU文件;

[0145] S52.在Windows测试机上导出FMU文件,并通过通用脚本文件调用FMU文件进行第一仿真工具RTLAB与第二仿真工具PowerFactory之间的通信,在电磁暂态仿真模型与机电暂态仿真模型之间进行数据交互量的标准化传输,实现动态仿真;步骤S52中在Windows测试机上导出FMU文件之前需要通过如下步骤进行机电暂态仿真模型的配置:

[0146] 添加DLS模型,并选择DLS模型的类型为编译模型;

[0147] 设置适配FMI标准的动态链接库文件;

[0148] 定义DLS模型的输入量为电磁暂态子网络的等值电流 I_s ,输出量为第一电流源的电流 I_E ,从而将DLS模型配置为机电暂态仿真模型;

[0149] 需要作为输入量和输出量交互的数据量只有电磁暂态子网络的等效电流幅值与相角和机电暂态子网络的等效电流幅值与相角。

[0150] 电磁暂态仿真模型使用Simulink搭建后导入到RTLAB中运行;PowerFactory模型首先被转换成符合FMI标准的FMU文件,然后利用自主编写的C++程序调用执行;RTLAB与运行着PowerFactory模型的数字计算机通过高速网线相连,进行基于UDP通信协议的高速数字化通信;在进行仿真时,两者以机电仿真的步长为周期进行数据交互;混合仿真的启停与仿真结果的查看均在RTLAB上位机中完成。

[0151] 应理解,上述实施例中各步骤的序号的大小并不意味着执行顺序的先后各过程的执行顺序应以其功能和内在逻辑确定,而不对本发明实施例的实施过程构成任何限定。

[0152] 以下是本公开实施例提供的电磁与机电实时混合仿真装置的实施例,该装置与上述各实施例的电磁与机电实时混合仿真方法属于同一个发明构思,在电磁与机电实时混合仿真装置的实施例中未详尽描述的细节内容,可以参考上述电磁与机电实时混合仿真方法的实施例。

[0153] 如图2所示,装置包括:

[0154] 仿真架构硬件搭建模块,用于基于第一仿真工具搭建电磁暂态仿真平台,基于第二仿真工具搭建机电暂态仿真平台,并建立两仿真平台的网络连接,完成混合仿真硬件架构搭建;仿真架构硬件搭建模块包括:

[0155] 电磁暂态仿真平台搭建单元,用于在RTLAB仿真机上使用第一仿真工具RTLAB搭建电磁暂态仿真平台;

[0156] 机电暂态仿真平台搭建单元,用于在Windows测试机上使用第二仿真工具PowerFactory搭建机电暂态仿真平台,其中,第一仿真工具RTLAB的仿真步长小于第二仿真工具PowerFactory的仿真步长,且两者的差值大于设定阈值;

[0157] 网络连接单元,用于建立电磁暂态仿真平台与机电暂态仿真平台之间的网络连接,并设定两仿真平台使用UDP通信协议进行通信;

[0158] 仿真网络划分模块,用于将完整的电力系统仿真网络划分为机电暂态子网络和电磁暂态子网络,通过对机电暂态子网络进行等效构建电磁暂态仿真模型,以及通过对电磁暂态子网络进行等效构建机电暂态仿真模型;仿真网络划分模块包括:

[0159] 网络划分单元,用于根据仿真精度要求,将完整的电力系统仿真网络划分为机电暂态子网络和电磁暂态子网络;

[0160] 机电暂态子网络等效单元,用于通过对机电暂态子网络等效的方式进行电磁暂态仿真,并将机电侧等效后的模型与电磁暂态子网络作为电磁暂态仿真模型;

[0161] 电磁暂态子网络等效单元,用于通过对电磁暂态子网络进行等效的方式进行机电暂态仿真,并将电磁侧等效后的模型与机电暂态子网络作为机电暂态仿真模型;

[0162] 数据交互量计算模块,用于通过电磁暂态仿真模型与机电暂态仿真模型结合计算电磁暂态仿真数据交互量和机电暂态仿真数据交互量;数据交互量计算模块包括:

[0163] 电磁暂态仿真模型图形化单元,用于对电磁暂态仿真模型中机电侧进行电路等效,引入频率相关网络等值导纳 $Y(s)$ 和第一电流源的电流 I_E ,得到电磁暂态仿真模型的图形化展示;

[0164] 机电暂态仿真模型图形化单元,用于将机电暂态仿真模型中机电暂态子网络使用诺顿等值电路表示,引入假想导纳 Y_0 和假想电流源的电流 I_R ,将电磁暂态子网络的等值电

流源的电流表示为 I_s ,得到机电暂态仿真模型的图形化展示;

[0165] 第一交互量计算单元,用于在电磁暂态仿真模型的仿真过程中根据机电侧的第一电流源的电流 I_E 计算出电磁暂态子网络的等值电流 I_s ,并将电磁暂态子网络的等值电流 I_s 作为第一交互量传递给机电暂态仿真模型,第一交互量为电磁暂态仿真数据交互量;

[0166] 第二交互量计算单元,在机电暂态仿真模型的仿真过程中根据第一交互量计算第二交互量,并将第二交互量传递给电磁暂态仿真模型,即根据电磁暂态子网络的等值电流 I_s 计算假想电流源的电流 I_R ,验证得到假想电流源的电流 I_R 与第一电流源的电流 I_E 相等,第二交互量为机电暂态仿真数据交互量;

[0167] 外插数据交互模块,用于将第一仿真工具与第二仿真工具中仿真步长大的仿真工具使用外插法进行仿真值的预测,实现两仿真工具的仿真步长同步;外插数据交互模块包括:

[0168] 第二仿真步长获取单元,用于获取第二仿真工具PowerFactory的仿真步长,记作 ΔT ;

[0169] 第一仿真步长获取单元,用于获取第一仿真工具RTLAB的仿真步长,记作 Δt ;

[0170] 步长比值计算单元,用于计算第二仿真工具PowerFactory与第一仿真工具RTLAB的仿真步长的比值 $M = \frac{\Delta T}{\Delta t}$;

[0171] 外插法仿真值预测单元,用于基于仿真步长的比值 $M = \frac{\Delta T}{\Delta t}$ 使用外插法计算电磁暂态仿真模型中机电侧的第一电流源的电流 I_E 的预测值,并将预测值作为机电暂态仿真数据交互量传递给电磁暂态仿真模型,实现两仿真模型的仿真步长同步;

[0172] 标准化传输模块,用于在动态仿真过程中使用功能模拟接口在两仿真平台之间传输数据交互量,实现两仿真模型间数据标准化传输;标准化传输模块包括:

[0173] FMU文件生成单元,用于将机电暂态仿真模型在第二仿真工具PowerFactory上封装成符合FMI标准的FMU文件;

[0174] FMU文件导出单元,用于在Windows测试机上导出FMU文件,并通过通用脚本文件调用FMU文件进行第一仿真工具RTLAB与第二仿真工具PowerFactory之间的通信,在电磁暂态仿真模型与机电暂态仿真模型之间进行数据交互量的标准化传输,实现动态仿真。

[0175] 尽管通过参考附图并结合优选实施例的方式对本发明进行了详细描述,但本发明并不限于此。在不脱离本发明的精神和实质的前提下,本领域普通技术人员可以对本发明的实施例进行各种等效的修改或替换,而这些修改或替换都应在本发明的涵盖范围内/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,可轻易想到变化或替换,都应涵盖在本发明的保护范围之内。

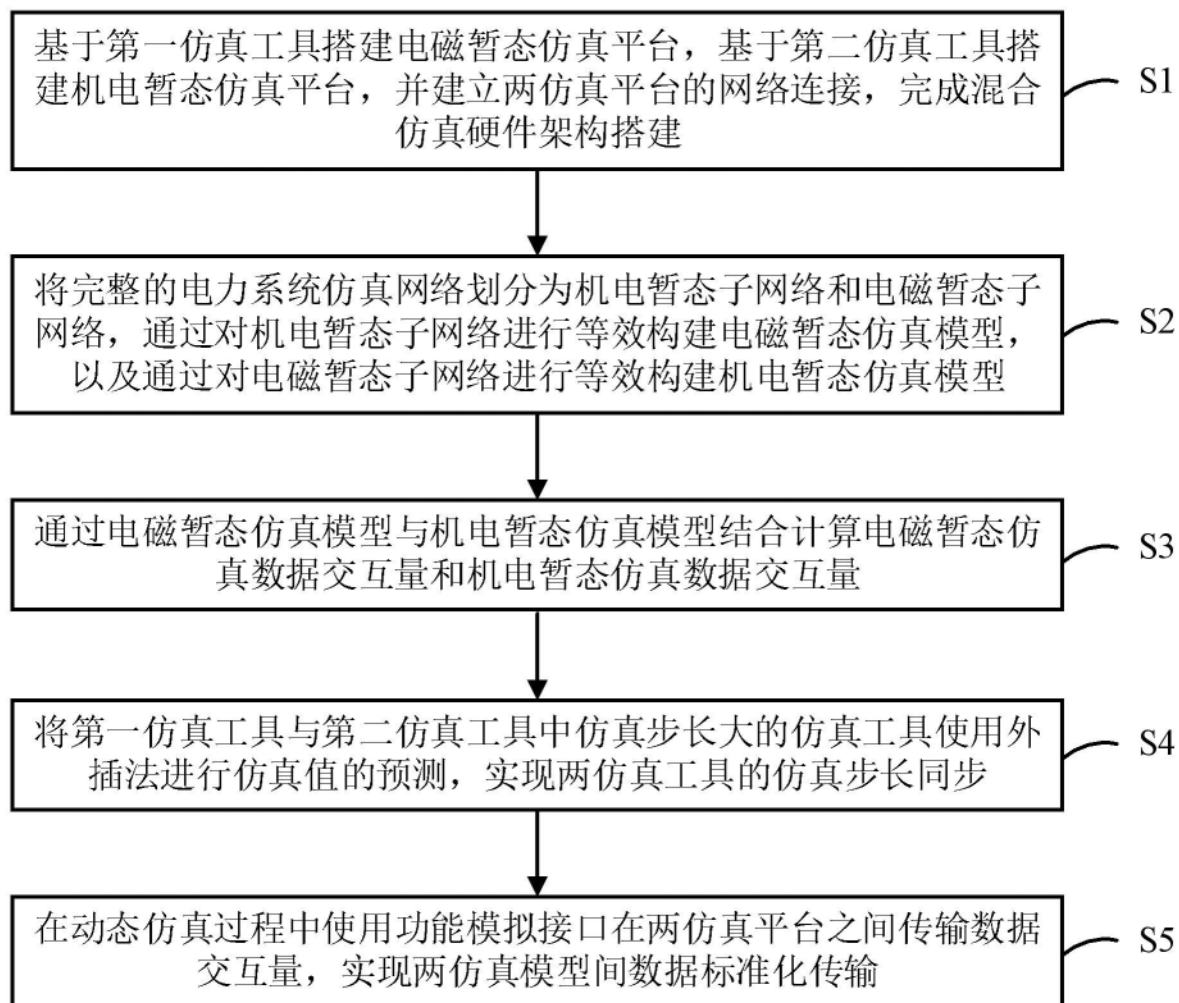


图1

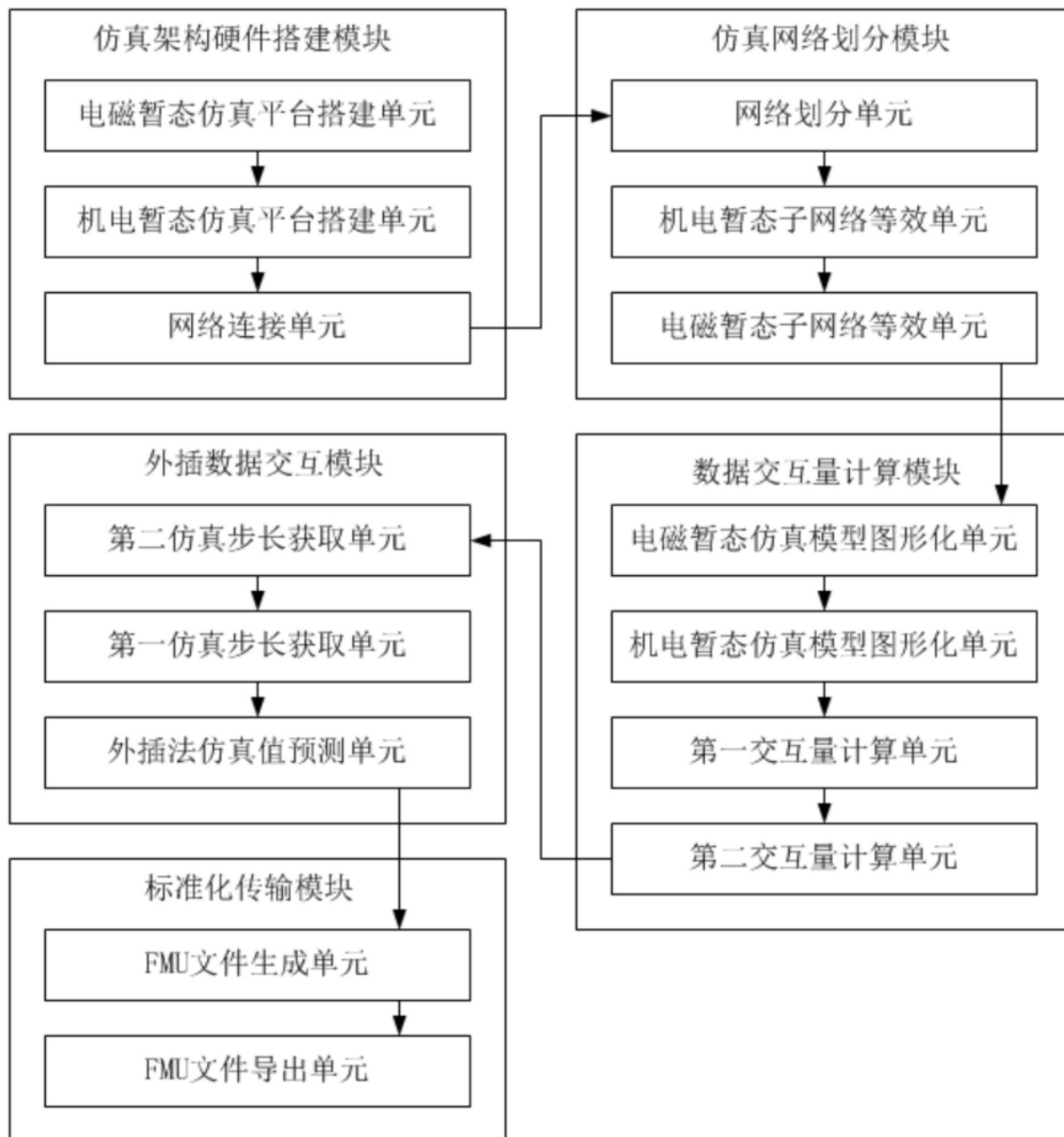


图2

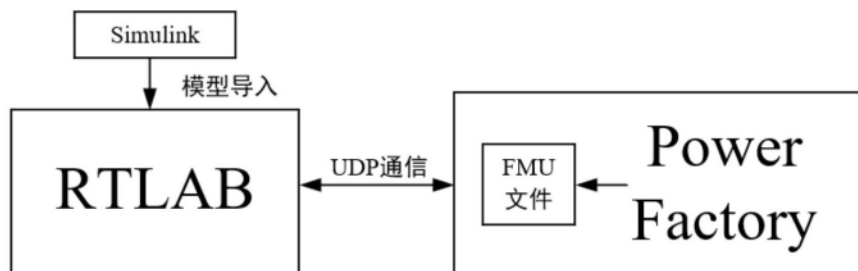


图3

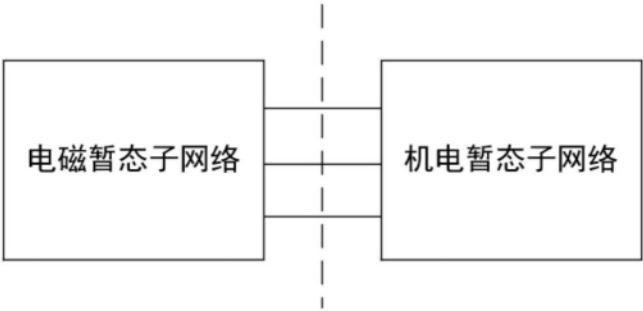


图4

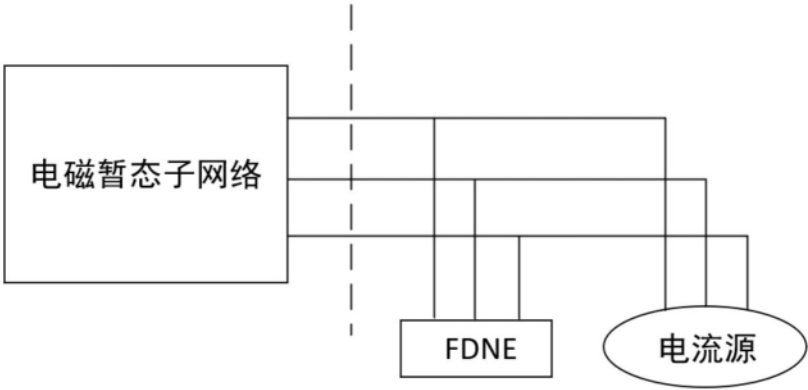


图5

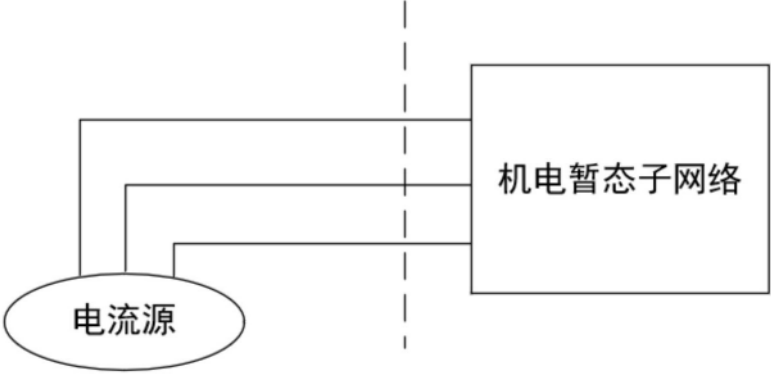


图6

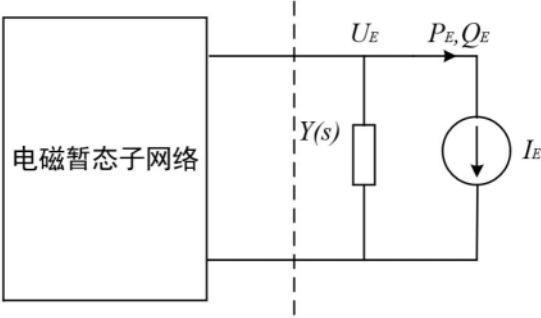


图7

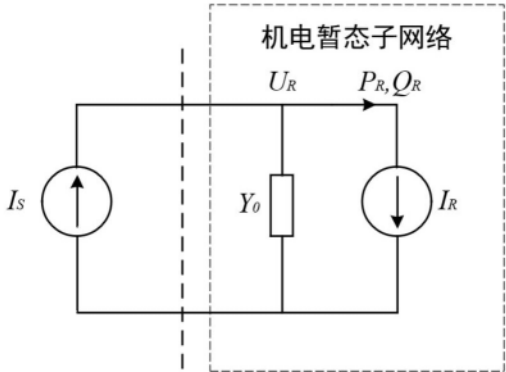


图8