

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2021 年 2 月 25 日 (25.02.2021)



(10) 国际公布号
WO 2021/031263 A1

(51) 国际专利分类号:
G06Q 50/06 (2012.01) **G06F 17/10** (2006.01)

国杰 (LI, Guojie); 中国上海市闵行区东川路 800 号, Shanghai 200240 (CN)。

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/106095

(22) 国际申请日: 2019 年 9 月 17 日 (17.09.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201910756536.9 2019 年 8 月 16 日 (16.08.2019) CN

(71) 申请人: 上海交通大学 (SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国上海市上海市闵行区东川路 800 号, Shanghai 200240 (CN)。

(72) 发明人: 汪可友 (WANG, Keyou); 中国上海市闵行区东川路 800 号, Shanghai 200240 (CN)。 李子润 (LI, Zirun); 中国上海市闵行区东川路 800 号, Shanghai 200240 (CN)。 徐晋 (XU, Jin); 中国上海市闵行区东川路 800 号, Shanghai 200240 (CN)。 吴盼 (WU, Pan); 中国上海市闵行区东川路 800 号, Shanghai 200240 (CN)。 李

(74) 代理人: 上海恒慧知识产权代理事务所 (特殊普通合伙) (SHANGHAI HENGHUI INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY); 中国上海市徐汇区桂平路 555 号 45 号楼 603 单元, Shanghai 200233 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,

(54) Title: HYBRID ELECTROMAGNETIC TRANSIENT SIMULATION METHOD SUITABLE FOR REAL-TIME SIMULATION OF MICROGRID

(54) 发明名称: 适用于微电网实时仿真的混合电磁暂态仿真方法

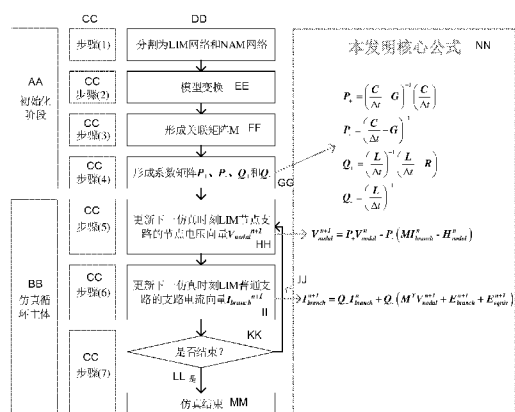


图 6

(57) Abstract: A hybrid electromagnetic transient simulation method suitable for real-time simulation of a microgrid. The biggest feature of the method is the combination of the traditional nodal analysis method (NAM) and the highly parallelized latency insertion method (LIM). Therefore, a microgrid is divided in a filter of a distributed power generation system to form a LIM network comprising power distribution lines and a plurality of NAM networks comprising the distributed power generation system. The NAM networks are simulated by the traditional NAM. The LIM network is simulated by the LIM, and in the initialization phase, an association matrix and four diagonal matrices comprising line parameters used in the LIM network simulation are formed according to the microgrid line topology and parameters. In the main simulation loop, the LIM network can be solved simultaneously with the plurality of NAM networks, so as to improve the parallelism of the microgrid simulation. In addition, the diagonal matrix multiplication is mainly used for the calculation of the LIM network simulation solution, so that the computational burden of the NAM during solving complicated network equations is reduced, thereby improving the simulation efficiency.

AA Initialization phase
BB Main simulation loop
CC Step
DD Divide into a LIM network and NAM networks
EE Model transformation
FF Form an association matrix M
GG Form coefficient matrices P, Q, and R
HH Update node voltage vector V_{node}^{m+1} of a LIM node branch at the next simulation moment
II Update branch current vector I_{branch}^{m+1} of a LIM ordinary branch at the next simulation moment
JJ No
KK To end or not?
LL Yes
MM End the simulation
NN Core equations of the present invention

NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布：

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要：一种适用于微电网实时仿真的混合电磁暂态仿真方法，其最大特点在于将传统的节点分析法(NAM)和高度并行化的延迟插入法(LIM)相结合，为此首先将微电网从分布式发电系统的滤波器处进行分割，分别形成一个包含配电线路的延迟插入(LIM)网络和多个包含分布式发电系统的节点分析(NAM)网络，NAM网络采用传统节点分析法仿真，LIM网络采用延迟插入法仿真，在其初始化阶段根据微电网线路拓扑和参数形成LIM网络仿真所用到的一个关联矩阵和四个含线路参数的对角矩阵，在仿真主体循环中，LIM网络可以和多个NAM网络同时求解，提高了微电网仿真的并行度，此外，LIM网络仿真求解过程中主要采用对角矩阵乘法进行计算，避免了节点分析法求解大型网络方程时的计算负担，提升了仿真效率。

适用于微电网实时仿真的混合电磁暂态仿真方法

技术领域

本发明涉及电力系统，特别是一种适用于微电网实时仿真的混合电磁暂态仿真方法。

背景技术

微电网可以实现配电网中新能源接入的能量管理。在微电网投入实际应用之前，需要对其控制器、保护装置和控制策略等进行基于电磁暂态仿真的硬件在环测试。

加拿大的 H.W Dommel 于 20 世纪 60 年代末提出电磁暂态仿真基本理论与方法。电磁暂态仿真主要可以分为离线仿真和实时仿真。一般来说,离线仿真工具的计算时间要远多于所研究暂态现象的持续时间。而在面向对时间有严格要求的应用场景时，实时仿真通过软硬件平台相互配合，保证了仿真器内部时钟与现实世界时钟的精确同步，可以为各种电力系统保护与控制装置提供高度模拟现场实际的测试环境。

在微电网中存在许多 AC/DC、DC/DC 变换器，其中电力电子开关的高频开关特性给微电网实现实时仿真的实现带来了巨大挑战。为了实现小步长实时仿真，仅需要硬件平台具有强大的计算能力，同样需要高效率的仿真模型与仿真算法。目前在电磁暂态实时仿真中，大多数仿真程序采用节点分析法（NAM），开关采用固定导纳模型进行建模。使用节点分析法求解节点电压方程的计算量与仿真规模成二次方比例，随着仿真规模的增加，FPGA 模块所消耗的硬件资源和执行时间将迅速增加。然而，延迟插入法（LIM）的计算量与仿真规模成线性比例。

在适用于微电网实时仿真的混合电磁暂态仿真方法中，电力电子变换器使用节点分析法（NAM）进行仿真，可以确保开关建模的准确性；配电网使用延迟插入法（LIM）进行仿真，减少硬件资源的消耗。LIM 网络和 NAM 网络可以同时求解，提高微电网仿真计算的并行度与效率。

发明内容

为了提高传统 EMTP 电磁暂态仿真算法的效率，本发明的目的在于提供一种适用于微电网实时仿真的混合电磁暂态仿真方法。该方法将微电网系统划分成一个延迟插入 (LIM) 网络和多个节点分析 (NAM) 网络，可以同时求解 LIM 网络和多个 NAM 网络，大幅提升了仿真计算的并行度，除此之外，该方法避免了仅使用节点分析法求解大型网络方程时的计算负担，提升了仿真效率。

本发明的技术解决方案如下：

一种适用于微电网实时仿真的混合电磁暂态仿真方法，其特点在于该方法包括以下步骤：

步骤 1) 网络分割：将微电网电路模型从分布式发电系统换流器出口的 LC 滤波器或 LCL 滤波器处进行分割，滤波器中靠近微电网线路的电感 L 串联上一个负极接地的等效电压源后，与微电网配电线路共同组成一个延迟插入 (LIM) 网络，各个 LC 滤波器或 LCL 滤波器剩下的电容并联上一个正方向对地的等效电流源后，与相应的分布式发电系统共同组成节点分析 (NAM) 网络；

步骤 2) 模型变换：将 LIM 网络中的配电线路用 PI 型等值模型表示，即节点间支路用电感和电阻串联表示，两端节点对地支路用电容表示，将 LIM 网络中的电压源用其诺顿等效形式表示，即等效电导并联等效电流源的形式，将 LIM 网络中的负载用恒阻抗模型表示，即电阻、电感和（或）电容并联的形式，最后，若节点间的支路若存在多条则折算成一条，并表示成电感（必要的）、电阻（非必要的）和电压源（非必要的）串联的形式，后面称之为 LIM 普通支路（如图 1 所示），若节点对地的支路存在多条则也折算成一条，并表示成电容（必要的）、电导（非必要的）和电流源（非必要的）并联的形式，后面称之为 LIM 节点支路（如图 2 所示），将 LIM 普通支路和 LIM 节点支路分别依次进行编号，其中接地节点的编号为 0；

步骤 3) 根据以下规则形成 LIM 网络的关联矩阵 M ：

i) 如果支路 p 和节点 q 相连，且支路 p 定义的电流正方向是流出节点 q ，则 $M(q,p)=1$ ；

ii) 如果支路 p 和节点 q 相连, 且支路 p 定义的电流正方向是流入节点 q , 则 $M(q,p)=-1$;

iii) 如果支路 p 和节点 q 不相连, 则则 $M(q,p)=0$;

步骤 4) 根据以下规则形成 LIM 网络的两个节点电压系数矩阵 P_+ 、 P_- 和两个支路电流系数矩阵 Q_+ 、 Q_- :

$$P_+ = \left(\frac{C}{\Delta t} + G \right)^{-1} \left(\frac{C}{\Delta t} \right) \quad P_- = \left(\frac{C}{\Delta t} + G \right)^{-1}$$

$$Q_+ = \left(\frac{L}{\Delta t} \right)^{-1} \left(\frac{L}{\Delta t} - R \right) \quad Q_- = \left(\frac{L}{\Delta t} \right)^{-1}$$

其中 C, G 是 $N_n \times N_n$ 的对角阵, 其对角元素为对应编号的 LIM 节点支路的对地电容和对地电导; L, R 是 $N_b \times N_b$ 的对角阵, 其对角元素为对应编号的 LIM 普通支路的电感和电容; Δt 为仿真步长; N_n, N_b 分别为 LIM 节点支路数和 LIM 普通支路数; 以上是仿真的初始化过程, 下面进入仿真主体循环过程;

步骤 5) 根据以下规则更新 LIM 节点支路的节点电压:

$$V_{nodal}^{n+1} = P_+ V_{nodal}^n - P_- (M I_{branch}^n - H_{nodal}^n)$$

其中 V_{nodal}^{n+1} 是第 $n+1$ 时刻的 LIM 节点支路的节点电压向量, I_{branch}^n 是第 n 时刻的 LIM 普通支路的支路电流向量, H_{nodal}^n 是第 n 时刻的 LIM 节点支路的等效电流源向量;

与此同时进行的是 NAM 网络的仿真求解, 具体方法可参考基于节点分析法的电磁暂态仿真教材, 本发明不做详细介绍;

步骤 6) 根据以下规则更新 LIM 普通支路的支路电流:

$$I_{branch}^{n+1} = Q_+ I_{branch}^n + Q_- (M^T V_{nodal}^{n+1} + E_{branch}^{n+1} + E_{equiv}^{n+1})$$

其中 M^T 是对关联矩阵 M 的转置操作, E_{equiv}^{n+1} 是第 $n+1$ 时刻的 LIM 普通支路的等效电压源向量, 其只在滤波器电感支路对应的位置为非零元素, 其大小为 NAM 网络中对应滤波器电容上的电压幅值; 计算得到的 I_{branch}^n 中滤波器电感支

路的电流将作为下次 NAM 网络仿真求解中对应的滤波器电容支路旁并联等效电流源；

步骤 7) 判断仿真是否结束，如否则返回步骤 5)，进入下一个仿真循环，直到指定的仿真时刻或收到提前终止的指令时，仿真结束。

与现有技术相比，本发明的技术效果：

1) 将传统的节点分析法 (NAM) 和高度并行化的延迟插入法 (LIM) 相结合，微电网的配电网络采用延迟插入法 (LIM) 进行仿真，被称为 LIM 网络，而分布式发电及其换流器系统采用节点分析法 (NAM) 进行仿真，被称为 NAM 网络。使得 LIM 网络可以和多个 NAM 网络可以同时进行求解，提高了微电网仿真计算的并行度。

2) 采用本方法进行微电网实时仿真时的计算速度比传统节点分析法更高，极大地提高了微电网实时仿真的仿真效率。在传统节点分析法中，节点电压方程中系数矩阵的逆是一个高阶的非对角矩阵，其计算量与节点数成二次方比例。在本发明方法下，LIM 网络的所有系数矩阵都是对角矩阵，NAM 网络的所有系数矩阵都是低阶的非对角矩阵，避免传统节点分析法求解大型网络方程时的计算负担，其总的计算量小于传统节点分析法，且与仿真规模成线性比例，提升了实时仿真效率。

3) 若在 XILINX 公司的 Kintex-7 410T FPGA 芯片上，分别用本方法和传统节点分析法对一个含 3 个三相逆变器、3 个 Boost 电路、21 条三相线路组成的微电网进行实时仿真。本方法最小可以采用 380ns 的仿真步长，消耗 FPGA 各项硬件资源如下：查找表 49.6%，触发器 48.8%，RAM 块 12.2%，DSP48 乘法器 63.1%。而传统方法最小可以采用 1970ns 的仿真步长，消耗 FPGA 各项硬件资源如下：查找表 81.8%，触发器 76.7%，RAM 块 12.2%，DSP48 乘法器将超过 100%，无法完成该微电网的实时仿真。因此，使用本发明方法可以在 FPGA 上实现更小的仿真步长和更大的仿真规模，从而提升了基于 FPGA 的微电网实时仿真能力，非常适合含多个电力电子变流器和大量配电线路的微电网亚微秒级实时仿真。

附图说明

图 1 是 LIM 普通支路示意图；

图 2 是 LIM 节点支路示意图；

图 3 是微电网结构图；

图 4 是本发明方法的网络分割示意图；

图 5 是本发明方法的仿真循环示意图；

图 6 是本发明适用于微电网实时仿真的混合电磁暂态仿真方法流程图。

具体实施方式

下面结合附图和实施例对本发明做进一步解释

如图 3 所示，以一个含 3 个三相逆变器、3 个 Boost 电路、21 条三相线路的微电网为例，对本发明进行阐述，但不应以此限制本发明的保护范围。

运用适用于微电网实时仿真的混合电磁暂态仿真方法对微电网进行实时仿真时，硬件部分主要为：①美国国家仪器(NI)公司的 PXIe 控制器（型号：PXIe-8135）：主要负责微电网控制系统的仿真，同时可以通过以太网与上位机进行通信，在上位机上显示实时仿真波形。②美国国家仪器(NI)公司的 FPGA 模块（型号：PXIe-7975R，内置一块 XILINX 公司的 Kintex-7 410T FPGA 芯片）：主要负责微电网电路部分的仿真，同时可以通过 I/O 端口与外置控制器和示波器相连，进行硬件在环仿真。它们之间通过 PXIe 总线进行通信，完成实时仿真。

软件部分主要为美国国家仪器(NI)公司的 Labview 开发环境。上位机、PXIe 控制器和 FPGA 模块中的程序均通过 Labview 进行编程。上位机中的程序完成与 PXIe 控制器的通讯以及仿真波形显示等功能；PXIe 控制器中的程序完成与上位机的通信、从 FPGA 模块中读取和写入数据、模拟换流器的控制系统等功能。上述程序不属于本发明保护范围，且美国国家仪器(NI)公司官网上提供相关的程序范例，故不再详细描述。而 FPGA 模块是本发明的具体实施载体，主要完成微电网仿真计算等功能，详见图 6 本发明适用于微电网实时仿真的混合电磁暂

态仿真方法流程图。

本发明适用于微电网实时仿真的混合电磁暂态仿真方法实施例子的步骤如下：

步骤 1) 将微电网模型从分布式发电系统换流器出口的 LC 滤波器或 LCL 滤波器处进行分割，滤波器中靠近微电网配电线路的电感 L 串联上一个负极接地的等效电压源后，与微电网配电线路共同组成一个延迟插入 (LIM) 网络；电容 C 并联上一个正方向对地的等效电流源后，与相应的分布式发电系统共同组成节点分析 (NAM) 网络。

步骤 2) 将 LIM 网络中的配电线路用 PI 型等值模型表示，即节点间支路用电感和电阻串联表示，两端节点对地支路用电容表示；将 LIM 网络中的电压源用其诺顿等效形式表示，即等效电导并联等效电流源的形式；将 LIM 网络中的负载用恒阻抗模型表示，即电阻、电感和（或）电容并联的形式。最后，若节点间的支路若存在多条则折算成一条，并表示成电感（必要的）、电阻（非必要的）和电压源（非必要的）串联的形式，后面称之为 LIM 普通支路（如图 1 所示），若节点对地的支路存在多条则也折算成一条，并表示成电容（必要的）、电导（非必要的）和电流源（非必要的）并联的形式，后面称之为 LIM 节点支路（如图 2 所示），将 LIM 普通支路和 LIM 节点支路分别依次进行编号。

步骤 3) 形成 LIM 网络的关联矩阵 M ：

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{54 \times 60}$$

步骤 4) 形成 LIM 网络的两个节点电压系数矩阵 P_+ 、 P_- 和两个支路电流系数矩阵 Q_+ 、 Q_- ：

$$P_+ = \left(\frac{C}{\Delta t} + G \right)^{-1} \left(\frac{C}{\Delta t} \right) \quad P_- = \left(\frac{C}{\Delta t} + G \right)^{-1}$$

$$P_+ = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0.6622 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0.6622 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0.6622 \end{bmatrix}_{54 \times 54}$$

$$P_- = \begin{bmatrix} 14.2587 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 14.2587 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 14.2587 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 9.4595 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 9.4595 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 9.4595 \end{bmatrix}_{54 \times 54}$$

$$Q_+ = \left(\frac{L}{\Delta t} \right)^{-1} \left(\frac{L}{\Delta t} - R \right) \quad Q_- = \left(\frac{L}{\Delta t} \right)^{-1}$$

$$Q_+ = \begin{bmatrix} 0.9994 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9994 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9994 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{60 \times 60}$$

$$Q_- = \begin{bmatrix} 0.0130 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0130 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0130 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 6.6667 \times 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 6.6667 \times 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 6.6667 \times 10^{-4} \end{bmatrix}_{60 \times 60}$$

其中 C, G 是 $N_n \times N_n$ 的对角阵, 其对角元素为对应编号的 LIM 节点支路的对地电容和对地电导; L, R 是 $N_b \times N_b$ 的对角阵, 其对角元素为对应编号的 LIM

普通支路的电感和电容； Δt 为仿真步长； N_n ， N_b 分别为 LIM 节点支路数和 LIM 普通支路数；以上是仿真的初始化过程，下面进入仿真主体循环过程。

步骤 5) 更新 LIM 节点支路的节点电压：

$$V_{nodal}^{n+1} = P_+ V_{nodal}^n - P_- (M I_{branch}^n - H_{nodal}^n)$$

$$V_{nodal}^n = \begin{bmatrix} -7.3687 \times 10^{-7} & -7.3687 \times 10^{-7} & \cdots & -2.1780 \times 10^{-7} & 4.3560 \times 10^{-7} \end{bmatrix}_{54 \times 1}^T$$

$$I_{branch}^n = \begin{bmatrix} 8.6629 \times 10^{-8} & 8.6629 \times 10^{-8} & \cdots & -8.6077 \times 10^{-6} & 1.7215 \times 10^{-5} \end{bmatrix}_{60 \times 1}^T$$

$$H_{nodal}^n = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{54 \times 1}^T$$

$$V_{nodal}^{n+1} = \begin{bmatrix} -1.9744 \times 10^{-6} & -1.9744 \times 10^{-6} & \cdots & -5.5864 \times 10^{-7} & 1.1173 \times 10^{-6} \end{bmatrix}_{54 \times 1}^T$$

其中 V_{nodal}^{n+1} 是第 $n+1$ 时刻的 LIM 节点支路的节点电压向量， I_{branch}^n 是第 n 时刻的 LIM 普通支路的支路电流向量， H_{nodal}^n 是第 n 时刻的 LIM 节点支路的等效电流源向量；与此同时进行的是 NAM 网络的仿真求解。

步骤 6) 更新 LIM 普通支路的支路电流：

$$I_{branch}^{n+1} = Q_+ I_{branch}^n + Q_- (M^T V_{nodal}^{n+1} + E_{branch}^{n+1} + E_{equiv}^{n+1})$$

$$E_{branch}^{n+1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{60 \times 1}^T$$

$$E_{equiv}^{n+1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & -0.0056 & 0.0112 \end{bmatrix}_{60 \times 1}^T$$

$$I_{branch}^{n+1} = \begin{bmatrix} 1.8467 \times 10^{-7} & 1.8467 \times 10^{-7} & \cdots & -1.2310 \times 10^{-5} & 2.4620 \times 10^{-5} \end{bmatrix}_{60 \times 1}^T$$

其中 M^T 是对关联矩阵 M 的转置操作， E_{equiv}^{n+1} 是第 $n+1$ 时刻的 LIM 普通支路的等效电压源向量，其只在滤波器电感支路对应的位置为非零元素，其大小为 NAM 网络中对应滤波器电容上的电压幅值；计算得到的 I_{branch}^{n+1} 中滤波器电感支路的电流将作为下次 NAM 网络仿真求解中对应的滤波器电容支路旁并联等效电流源；

步骤 7) 返回步骤 5，进入下一个仿真循环。

$$V_{nodal}^{n+1} = \begin{bmatrix} -1.9744 \times 10^{-6} & -1.9744 \times 10^{-6} & \cdots & -5.5864 \times 10^{-7} & 1.1173 \times 10^{-6} \end{bmatrix}_{54 \times 1}^T$$

$$I_{branch}^{n+1} = \begin{bmatrix} 1.8467 \times 10^{-7} & 1.8467 \times 10^{-7} & \cdots & -1.2310 \times 10^{-5} & 2.4620 \times 10^{-5} \end{bmatrix}_{60 \times 1}^T$$

$$\mathbf{H}_{nodal}^{n+1} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0]_{54 \times 1}^T$$

$$\mathbf{V}_{nodal}^{n+2} = [-4.6126 \times 10^{-6} \ -4.6126 \times 10^{-6} \ \dots \ -1.2551 \times 10^{-6} \ 2.5101 \times 10^{-6}]_{54 \times 1}^T$$

$$\mathbf{E}_{branch}^{n+2} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0]_{60 \times 1}^T$$

$$\mathbf{E}_{equiv}^{n+2} = [0 \ 0 \ \dots \ -0.0072 \ 0.0144]_{60 \times 1}^T$$

$$\mathbf{I}_{branch}^{n+2} = [3.5258 \times 10^{-7} \ 3.5258 \times 10^{-7} \ \dots \ -1.7057 \times 10^{-5} \ 3.4114 \times 10^{-5}]_{60 \times 1}^T$$

如此循环计算步骤 5-步骤 7, 直到指定的仿真时刻或收到提前终止的指令时, 仿真结束。

经实验表明, 在 XILINX 公司的 Kintex-7 410T FPGA 芯片上, 分别用本方法和传统节点分析法对一个含 3 个三相逆变器、3 个 Boost 电路、21 条三相线路组成的微电网进行实时仿真。本方法最小可以采用 380ns 的仿真步长, 消耗 FPGA 各项硬件资源如下: 查找表 49.6%, 触发器 48.8%, RAM 块 12.2%, DSP48 乘法器 63.1%。而传统方法最小可以采用 1970ns 的仿真步长, 消耗 FPGA 各项硬件资源如下: 查找表 81.8%, 触发器 76.7%, RAM 块 12.2%, DSP48 乘法器将超过 100%, 无法完成该微电网的实时仿真。因此, 使用本发明方法可以在 FPGA 上实现更小的仿真步长和更大的仿真规模, 从而提升了基于 FPGA 的微电网实时仿真能力, 非常适合含多个电力电子变流器和大量配电线路的微电网亚微秒级实时仿真。

权 利 要 求 书

1、一种适用于微电网实时仿真的混合电磁暂态仿真方法，其特征在于该方法包括初始化阶段和仿真循环阶段，具体步骤如下：

初始化阶段：

步骤 1) 网络分割：将微电网模型从分布式发电系统换流器出口的滤波器处进行分割，滤波器中靠近微电网配电线路的电感 L 串联上一个负极接地的等效电压源后，与微电网配电线路共同组成一个延迟插入网络（以下简称 LIM），各滤波器剩下的电容并联上一个正方向对地的等效电流源后，与相应的分布式发电系统共同组成节点分析网络（以下简称 NAM）；

步骤 2) 模型变换：将 LIM 网络中的配电线路用 PI 型等值模型表示，即节点间支路用电感和电阻串联表示，两端节点对地支路用电容表示，将 LIM 网络中的电压源用其诺顿等效形式表示，即等效电导并联等效电流源的形式，将 LIM 网络中的负载用恒阻抗模型表示，即电阻、电感和/或电容并联的形式，最后，若节点间的支路存在多条则折算成一条，并表示成电感、电阻和/或电压源串联的形式，称之为 LIM 普通支路，若节点对地的支路存在多条则也算成一条，并表示成电容、电导/或电流源并联的形式，称之为 LIM 节点支路，将 LIM 普通支路和 LIM 节点支路分别依次进行编号，其中接地节点的编号为 0；

步骤 3) 根据以下规则形成 LIM 网络的关联矩阵 M ：

i) 如果支路 p 和节点 q 相连，且支路 p 定义的电流正方向是流出节点 q ，则 $M(q,p)=1$ ；

ii) 如果支路 p 和节点 q 相连，且支路 p 定义的电流正方向是流入节点 q ，则 $M(q,p)=-1$ ；

iii) 如果支路 p 和节点 q 不相连，则 $M(q,p)=0$ ；

步骤 4) 根据以下规则形成 LIM 网络的两个节点电压系数矩阵 P_+ 、 P_- 和两个支路电流系数矩阵 Q_+ 、 Q_- ：

$$P_+ = \left(\frac{C}{\Delta t} + G \right)^{-1} \left(\frac{C}{\Delta t} \right) \quad P_- = \left(\frac{C}{\Delta t} + G \right)^{-1}$$

$$\mathbf{Q}_+ = \left(\frac{\mathbf{L}}{\Delta t} \right)^{-1} \left(\frac{\mathbf{L}}{\Delta t} - \mathbf{R} \right) \quad \mathbf{Q}_- = \left(\frac{\mathbf{L}}{\Delta t} \right)^{-1}$$

其中 $\mathbf{C}, \mathbf{G}$ 是 $N_n \times N_n$ 的对角阵, 对角元素为对应编号的 LIM 节点支路的对地电容和对地电导; $\mathbf{L}, \mathbf{R}$ 是 $N_b \times N_b$ 的对角阵, 对角元素为对应编号的 LIM 普通支路的电感和电容; Δt 为仿真步长; N_n, N_b 分别为 LIM 节点支路数和 LIM 普通支路数;

仿真循环阶段:

步骤 5) 根据以下规则更新 LIM 节点支路的节点电压:

$$\mathbf{V}_{nodal}^{n+1} = \mathbf{P}_+ \mathbf{V}_{nodal}^n - \mathbf{P}_- (\mathbf{M} \mathbf{I}_{branch}^n - \mathbf{H}_{nodal}^n)$$

其中 $\mathbf{V}_{nodal}^{n+1}$ 是第 $n+1$ 时刻的 LIM 节点支路的节点电压向量, $\mathbf{I}_{branch}^n$ 是第 n 时刻的 LIM 普通支路的支路电流向量, $\mathbf{H}_{nodal}^n$ 是第 n 时刻的 LIM 节点支路的等效电流源向量;

同时进行 NAM 网络的仿真求解;

步骤 6) 根据以下规则更新 LIM 普通支路的支路电流, 作为下次 NAM 网络仿真求解中对应的滤波器电容支路旁并联等效电流源:

$$\mathbf{I}_{branch}^{n+1} = \mathbf{Q}_+ \mathbf{I}_{branch}^n + \mathbf{Q}_- (\mathbf{M}^T \mathbf{V}_{nodal}^{n+1} + \mathbf{E}_{branch}^{n+1} + \mathbf{E}_{equiv}^{n+1})$$

其中 $\mathbf{M}^T$ 是对关联矩阵 $\mathbf{M}$ 的转置操作, $\mathbf{E}_{equiv}^{n+1}$ 是第 $n+1$ 时刻的 LIM 普通支路的等效电压源向量, 其只在滤波器电感支路对应的位置为非零元素, 大小为 NAM 网络中对应滤波器电容上的电压幅值;

步骤 7) 判断仿真是否结束, 如否则返回步骤 5), 进入下一个仿真循环, 直到指定的仿真时刻或收到提前终止的指令时, 仿真结束。

2、根据权利要求 1 所述的适用于微电网实时仿真的混合电磁暂态仿真方法, 其特征在于, 所述的滤波器为 LC 滤波器或 LCL 滤波器。

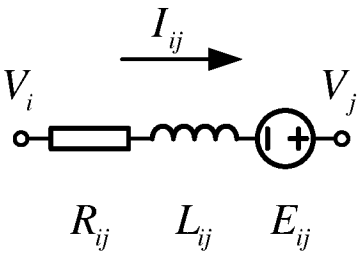


图 1

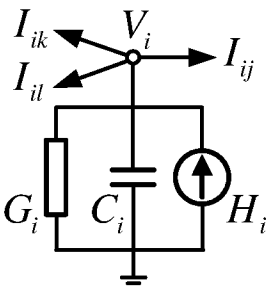


图 2

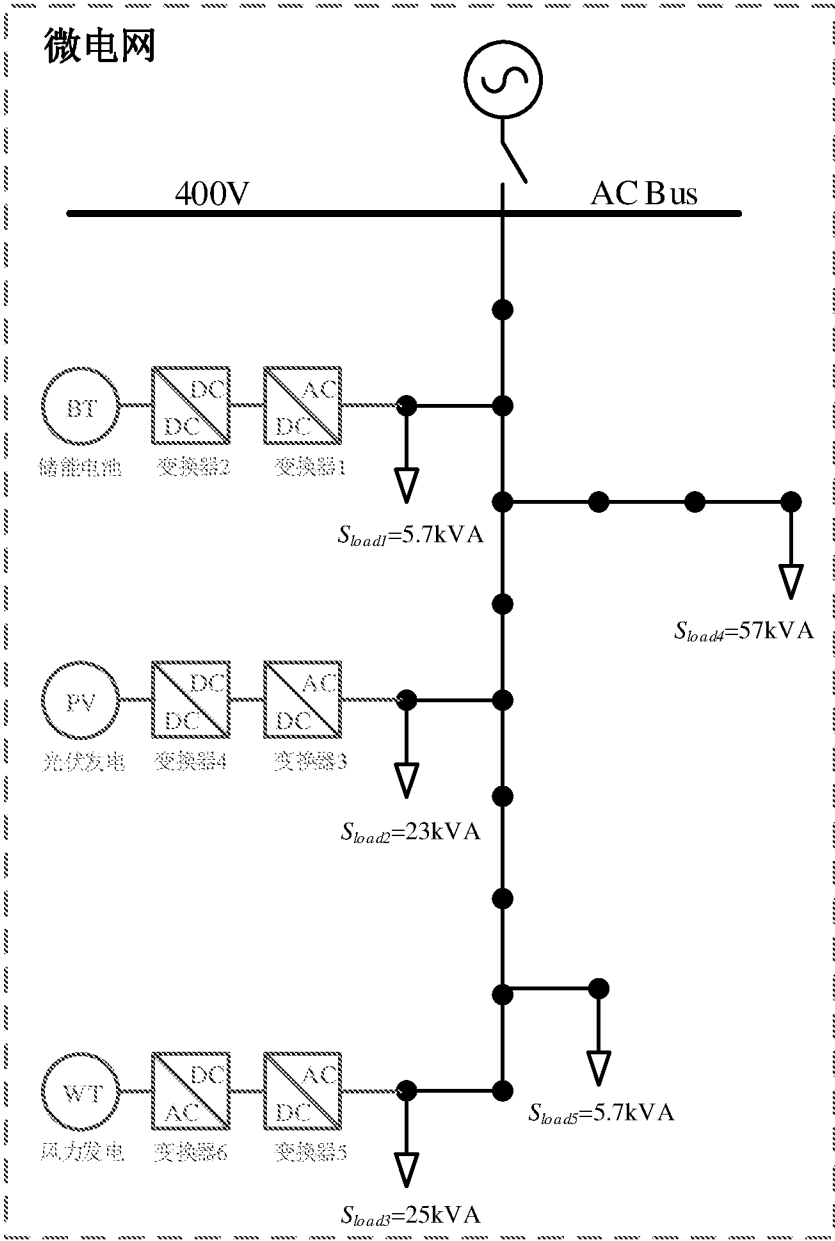


图 3

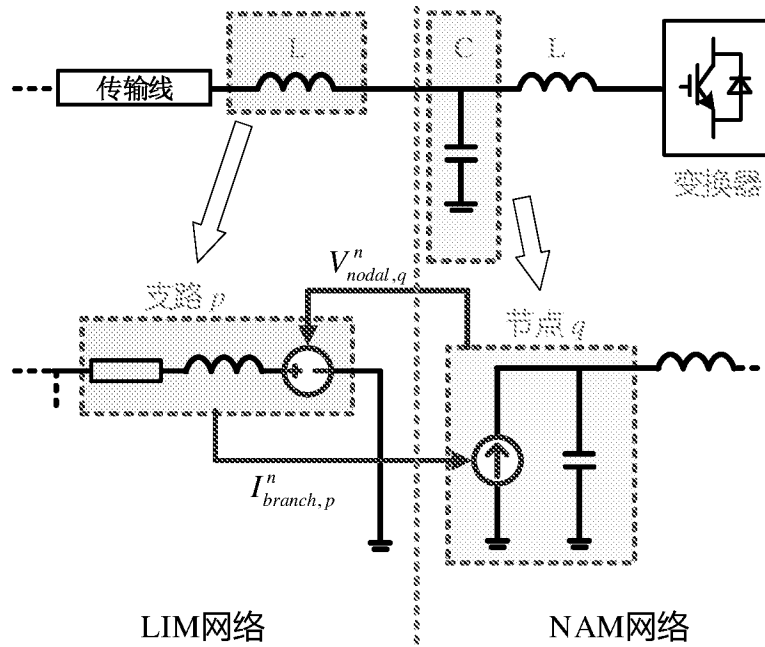


图 4

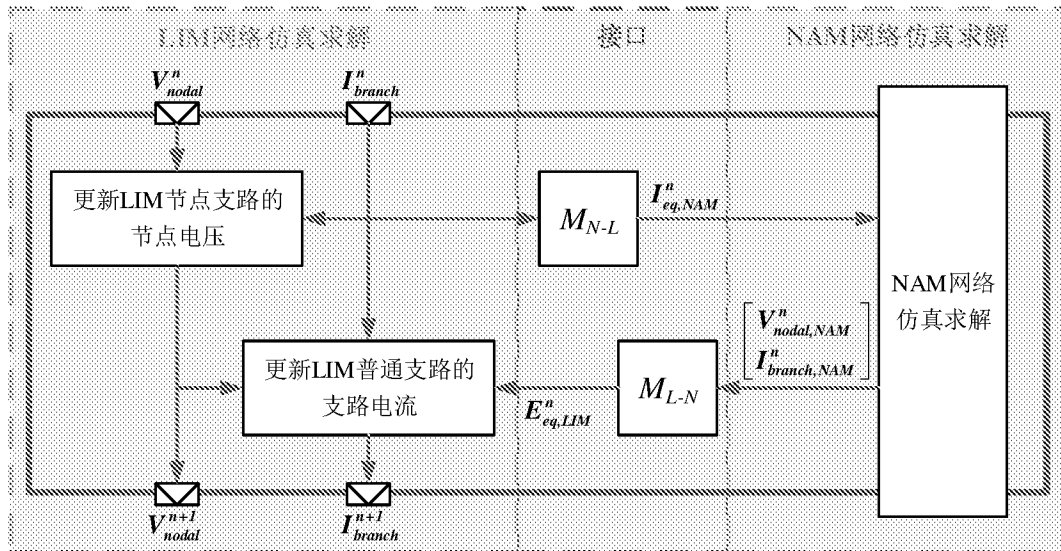


图 5

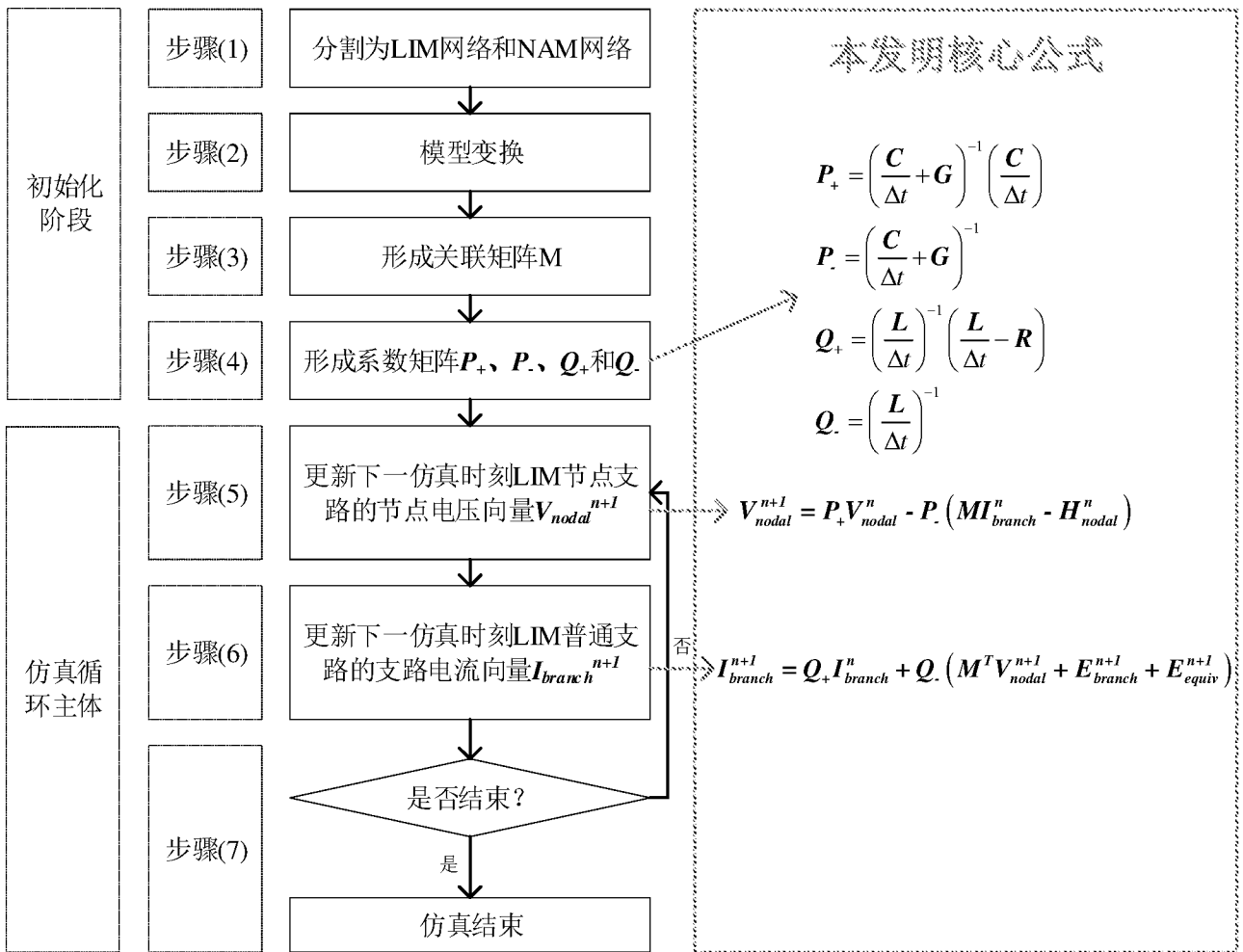


图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/106095

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06Q 50/06(2012.01)i; G06F 17/10(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06Q; G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI: 微电网, 实时, 仿真, 电磁暂态, 分割, 分区, 延时, 延迟, 节点, microgrid, real-time, simulation, electromagnetic, transient, area, delay, node

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 106777636 A (TIANJIN UNIVERSITY) 31 May 2017 (2017-05-31) description, paragraphs [0006]-[0044], and figures 9-10	1-2,
A	CN 106886617 A (CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE STATE GRID CORP CHINA et al.) 23 June 2017 (2017-06-23) entire document	1-2,
A	CN 106372339 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 01 February 2017 (2017-02-01) entire document	1-2,
A	CN 106777827 A (CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE STATE GRID CORP CHINA et al.) 31 May 2017 (2017-05-31) entire document	1-2,
A	CN 109614700 A (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE OF STATE GRID SHANGDONG ELECTRIC POWER COMPANY et al.) 12 April 2019 (2019-04-12) entire document	1-2,
A	EP 3264357 A1 (GENERAL ELECTRIC COMPANY SCHENECTADY) 03 January 2018 (2018-01-03) entire document	1-2,



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

04 May 2020

Date of mailing of the international search report

20 May 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/106095

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	106777636	A	31 May 2017	None			
CN	106886617	A	23 June 2017	None			
CN	106372339	A	01 February 2017	CN	106372339	B	09 August 2019
CN	106777827	A	31 May 2017	None			
CN	109614700	A	12 April 2019	None			
EP	3264357	A1	03 January 2018	US	10372847	B2	06 August 2019
				US	2018004867	A1	04 January 2018

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/106095

A. 主题的分类 G06Q 50/06(2012.01)i; G06F 17/10(2006.01)i 按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类																							
B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) G06Q; G06F 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) CNPAT, WPI, EPDOC, CNKI: 微电网, 实时, 仿真, 电磁暂态, 分割, 分区, 延时, 延迟, 节点, microgrid, real-time, simulation, electromagnetic, transient, area, delay, node																							
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>CN 106777636 A (天津大学) 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31) 说明书第[0006]-[0044]段、图9-10</td> <td>1-2</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106886617 A (中国电力科学研究院 等) 2017年 6月 23日 (2017 - 06 - 23) 全文</td> <td>1-2</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106372339 A (清华大学) 2017年 2月 1日 (2017 - 02 - 01) 全文</td> <td>1-2</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106777827 A (中国电力科学研究院 等) 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31) 全文</td> <td>1-2</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 109614700 A (国网山东省电力公司电力科学研究院 等) 2019年 4月 12日 (2019 - 04 - 12) 全文</td> <td>1-2</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>EP 3264357 A1 (GENERAL ELECTRIC COMPANY SCHENECTADY) 2018年 1月 3日 (2018 - 01 - 03) 全文</td> <td>1-2</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	CN 106777636 A (天津大学) 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31) 说明书第[0006]-[0044]段、图9-10	1-2	A	CN 106886617 A (中国电力科学研究院 等) 2017年 6月 23日 (2017 - 06 - 23) 全文	1-2	A	CN 106372339 A (清华大学) 2017年 2月 1日 (2017 - 02 - 01) 全文	1-2	A	CN 106777827 A (中国电力科学研究院 等) 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31) 全文	1-2	A	CN 109614700 A (国网山东省电力公司电力科学研究院 等) 2019年 4月 12日 (2019 - 04 - 12) 全文	1-2	A	EP 3264357 A1 (GENERAL ELECTRIC COMPANY SCHENECTADY) 2018年 1月 3日 (2018 - 01 - 03) 全文	1-2
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																					
A	CN 106777636 A (天津大学) 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31) 说明书第[0006]-[0044]段、图9-10	1-2																					
A	CN 106886617 A (中国电力科学研究院 等) 2017年 6月 23日 (2017 - 06 - 23) 全文	1-2																					
A	CN 106372339 A (清华大学) 2017年 2月 1日 (2017 - 02 - 01) 全文	1-2																					
A	CN 106777827 A (中国电力科学研究院 等) 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31) 全文	1-2																					
A	CN 109614700 A (国网山东省电力公司电力科学研究院 等) 2019年 4月 12日 (2019 - 04 - 12) 全文	1-2																					
A	EP 3264357 A1 (GENERAL ELECTRIC COMPANY SCHENECTADY) 2018年 1月 3日 (2018 - 01 - 03) 全文	1-2																					
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																							
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																							
国际检索实际完成的日期 2020年 5月 4日		国际检索报告邮寄日期 2020年 5月 20日																					
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		受权官员 梁雪峰 电话号码 86-(10)-53961263																					

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/106095

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	106777636	A	2017年 5月 31日	无	
CN	106886617	A	2017年 6月 23日	无	
CN	106372339	A	2017年 2月 1日	CN 106372339	B 2019年 8月 9日
CN	106777827	A	2017年 5月 31日	无	
CN	109614700	A	2019年 4月 12日	无	
EP	3264357	A1	2018年 1月 3日	US 10372847	B2 2019年 8月 6日
				US 2018004867	A1 2018年 1月 4日