# 关注区可变的实时仿真方法与平台

张炳达,靳朝,朱俊杰,张 佳 (天津大学智能电网教育部重点实验室,天津 300072)

摘要:交直流混合电网的实时仿真既要考虑电力电子设备的开关特性,又要保证适应较大的电网规模,在实际工程中面临诸多困难。给子网络赋予动态可变的关注标志,对关注子网络采用存储压力小的节点消去法, 对非关注子网络采用计算量少的线性组合法,从而保证骨架型节点电压法的实用性。在Xilinx公司的 Virtex-7 FPGA VC709开发板中,采用无缝的并行化仿真计算程序对接方式和灵活的结构参数查询方法解决 了现场可编程逻辑门阵列资源的紧缺问题,设计了一种关注区可变的实时数字仿真平台。以典型的交直流 混合电网为例,仿真验证了所提方法的可行性与所研发平台的有效性。

 关键词:交直流混合电网;实时仿真;骨架型节点电压法;关注区可变;现场可编程逻辑门阵列

 中图分类号:TM 743

 文献标志码:A

 DOI:10.16081/j.epae.202101010

# 0 引言

随着中国特高压交直流电网的快速发展,交直流、多直流之间的相互影响加剧,电网的安全运行面临严峻挑战<sup>[1]</sup>。控制和保护系统对交直流混合电网的安全可靠运行起着重要的作用,而基于实时仿真的硬件在环HIL(Hardware-In-Loop)测试可以验证交直流混合电网中保护装置动作的正确性和控制策略的有效性。交直流混合电网中存在大量的电力电子设备,与传统的输电网相比,其动态特性时间尺度更小,实时仿真程序需要兼顾较大的仿真规模和较短的仿真步长<sup>[2]</sup>。高效的计算方法和计算能力强的硬件平台是实现交直流混合电网全电磁暂态实时仿真的2个重要保证。

在进行交直流混合电网电磁暂态仿真时,一般 从增加算法并行度和减少计算量2个方面入手对仿 真算法进行改进<sup>[3]</sup>。中国电力科学研究院提出了节 点分裂法、分布参数线路解耦法等并行计算方法,将 交流输电网络和直流输电网络分开计算,并依据其 连接关系进行统一求解<sup>[4]</sup>。文献[5]预先计算得到 各种可能需要的电导矩阵的逆矩阵,显著加快了直 流输电网络的仿真速度,但当直流输电网络中的开 关元件较多时,逆矩阵存储量过大,难以在实际工程 中实现应用。为了减少因开关元件频繁动作而增加 的计算量,文献[6]采用伴随离散电路模型对开关元 件进行建模,使得开关元件进行状态切换时直流输 电网络的节点导纳矩阵保持不变,但该方法的仿真 精度会受到影响。

目前,主流的实时仿真装置主要有实时数字仿

收稿日期:2020-08-06;修回日期:2020-11-17 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477114) Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477114) 真系统(RTDS)、HYPERSIM、电力系统实时仿真工 具 ADPSS等。我国建立的具有自主知识产权的 ADPSS主要应用于机电-电磁混合仿真<sup>[7]</sup>。近年来, 国内科研院所利用 RTDS<sup>[8]</sup>或者 HYPERSIM<sup>[9]</sup>平台在 大规模交直流系统实时仿真方面取得了很大的进 展。RTDS承担计算任务的硬件由若干 rack构成, HYPERSIM 基于 SGI 超级计算机运行,都采用多台 处理器并行计算以提高仿真规模,但底层计算硬件 本质上仍属于串行器件。另外,现有平台对硬件配 置要求高,设备成本过于高昂<sup>[10]</sup>,因此不利于推广。

现场可编程逻辑门阵列(FPGA)具有完全可配 置的并行硬件结构、分布式内存结构、深度流水线结 构,且具有成本低、体积小等优点,逐渐作为主要硬 件参与电力系统实时仿真计算<sup>[11]</sup>。文献[12-13]在 FPGA上根据电力系统的数学模型建立专门的计算 模块,提高了实时仿真速度。但专用模块受到计算 流程的限制而经常处于空闲状态,造成FPGA资源 的浪费。文献[14]设计了一种基于FPGA和指令流 的实时数字仿真平台(FRTDS)。FRTDS打破了仿真 对象直接硬件化的设计理念,为实现电力系统电磁 暂态实时仿真提供了新的思路。受使用的仿真算法 与FPGA中计算资源的限制,现有FRTDS的仿真规 模较小。

为了减少实时仿真的计算量,避免线性组合法 带来的子网络结构参数无法预存的问题,本文将子 网络分为关注子网络与非关注子网络。对关注子网 络、非关注子网络分别采用存储压力小的节点消去 法、计算量少的线性组合法进行子网络等效与求解。 在此基础上,对原有 FRTDS 的软硬件进行改造,使 其在较短的仿真步长下能够运行网络规模较大的关 注区可变的仿真程序。通过对典型的交直流混合电 网进行仿真,验证了所提方法的可行性与所研发平 台的有效性。

# 1 骨架型节点电压法

212

在电力系统电磁暂态仿真中,常见的电气元件 有电源、电阻、电感、电容,其中电感、电容的伏安特 性通过微分方程描述。状态变量分析方法属于一般 性的建模方法,适用于电力系统电磁暂态仿真<sup>[15]</sup>。

包含2个线性含源子网络的电力系统示意图如图1所示。子网络内部包含若干电阻 R、电感L、电容C元件,子网络的输入变量向量由子网络内部的独立电压源/电流源(w)以及子网络端口处的电压(u)/电流(i)两部分组成。



图1 电力系统示意图



若将子网络端口处的电压看作子网络的输入变量向量,将电流看作子网络的输出变量向量,则子网络a和子网络b的状态方程和输出方程分别为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_{a} = \mathbf{A}_{a}\mathbf{x}_{a} + \mathbf{B}_{a}\mathbf{w}_{a} + \mathbf{E}_{a}\mathbf{u} \\ \dot{\mathbf{i}}_{a} = \mathbf{C}_{a}\mathbf{x}_{a} + \mathbf{D}_{a}\mathbf{w}_{a} + \mathbf{F}_{a}\mathbf{u} \end{cases}$$
(1)  
$$\langle \dot{\mathbf{x}}_{b} = \mathbf{A}_{b}\mathbf{x}_{b} + \mathbf{B}_{b}\mathbf{w}_{b} + \mathbf{E}_{b}\mathbf{u}$$
(2)

$$(i_{\rm b} = C_{\rm b} x_{\rm b} + D_{\rm b} w_{\rm b} + F_{\rm b} u$$

其中,下标a、b分别表示子网络a、子网络b的变量;*i* 为子网络端口处的电流向量;*u*为子网络端口处的 电压向量;*w*为子网络内部的独立电源电压向量;*x* 为子网络的状态变量向量;*A*为系统的状态矩阵;*B*、 *E*为系统的输入矩阵;*C*为系统的输出矩阵;*D*、*F*为 系统的直接传输系数矩阵。采用后退欧拉法对式 (1)和式(2)进行差分化处理,整理后可得:

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_{a}(t) = \boldsymbol{A}_{a}^{*}\boldsymbol{x}_{a}(t-\Delta t) + \boldsymbol{B}_{a}^{*}\boldsymbol{w}_{a}(t) + \boldsymbol{E}_{a}^{*}\boldsymbol{u}(t) \\ \boldsymbol{i}_{a}(t) = \boldsymbol{C}_{a}^{*}\boldsymbol{x}_{a}(t-\Delta t) + \boldsymbol{D}_{a}^{*}\boldsymbol{w}_{a}(t) + \boldsymbol{F}_{a}^{*}\boldsymbol{u}(t) \end{cases}$$
(3)

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_{\mathrm{b}}(t) = \boldsymbol{A}_{\mathrm{b}}^{*}\boldsymbol{x}_{\mathrm{b}}(t - \Delta t) + \boldsymbol{B}_{\mathrm{b}}^{*}\boldsymbol{w}_{\mathrm{b}}(t) + \boldsymbol{E}_{\mathrm{b}}^{*}\boldsymbol{u}(t) \\ \boldsymbol{i}_{\mathrm{b}}(t) = \boldsymbol{G}_{\mathrm{b}}^{*}\boldsymbol{x}_{\mathrm{b}}(t - \Delta t) + \boldsymbol{D}_{\mathrm{b}}^{*}\boldsymbol{w}_{\mathrm{b}}(t) + \boldsymbol{F}_{\mathrm{b}}^{*}\boldsymbol{u}(t) \end{cases}$$
(4)

其中,各系数矩阵 $A^*$ 、 $B^*$ 、 $C^*$ 、 $D^*$ 、 $E^*$ 、 $F^*$ 的计算与式 (1)和式(2)中的矩阵A、B、C、D、E、F及仿真步长  $\Delta t$ 有关。由式(3)和式(4)可以看出,t时刻子网络的状 态变量向量 $\mathbf{x}(t)$ 和输出变量向量 $\mathbf{i}(t)$ 是 $t-\Delta t$ 时刻子 网络的状态向量 $\mathbf{x}(t-\Delta t)$ 、t时刻子网络内部的独立 电源电压向量 $\mathbf{w}(t)$ 、t时刻子网络端口处电压向量 u(t)的线性组合。将式(3)和式(4)中第2个子式等 号右边的前2项合并,得到子网络的诺顿等效电路 表达式为:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{i}}_{a}(t) = \boldsymbol{P}_{a}(t) + \boldsymbol{F}_{a}^{*}\boldsymbol{u}(t) \\ \dot{\boldsymbol{i}}_{b}(t) = \boldsymbol{P}_{b}(t) + \boldsymbol{F}_{b}^{*}\boldsymbol{u}(t) \end{cases}$$
(5)

$$P_{a}(t) = C_{a}^{*} \boldsymbol{x}_{a}(t - \Delta t) + D_{a}^{*} \boldsymbol{w}_{a}(t)$$

$$P_{b}(t) = C_{b}^{*} \boldsymbol{x}_{b}(t - \Delta t) + D_{b}^{*} \boldsymbol{w}_{b}(t)$$

$$\text{th} \mp \boldsymbol{i}_{a}(t) = \boldsymbol{i}_{b}(t), \ \overrightarrow{\mathbf{\Pi}} \ \overrightarrow{\mathbf{H}}:$$

$$(F_{a}^{*} - F_{b}^{*})\boldsymbol{u}(t) = P_{b}(t) - P_{a}(t)$$

$$(6)$$

将式(6)称为骨架型节点的电压方程。由式(6) 求解得到子网络端口处的电压向量*u*后,根据式(3) 和式(4)可直接计算得到子网络的状态变量向量*x*。

将上述过程称为骨架型节点电压法,具体步骤 可概括如下:

(1)形成子网络的诺顿等效电路;

(2)形成骨架节点的电压方程;

(3)求解骨架节点的电压方程;

(4)求解子网络的状态变量。

为了方便叙述,将式(3)和式(4)中的A\*、B\*、C\*、 D\*、E\*、F\*统称为结构参数。若提前计算得到结构参数,则在进行实时仿真时通过矩阵的乘加运算就能够完成子网络的等效与求解。因此,骨架型节点电压法具有计算量小的特点。

# 2 线性组合法与节点消去法的混合使用

# 2.1 非线性元件和时变元件引发的问题

现阶段交直流混合电网的换流器主要由晶闸管 组成。晶闸管在门极收到触发信号且两端电压大于 导通阈值电压时导通,触发成功后晶闸管维持导通 状态。当流过晶闸管的电流降为0后,晶闸管关断。 晶闸管导通时的电阻取值很小,关断时的电阻取值 很大,是一个时变的非线性元件。电力系统中还存 在断路器、隔离刀闸、接地刀闸等时变的开关元件, 实时仿真中的短路故障、断线故障也是通过在系统 中添加开关元件实现的。设置故障时也需要对接地 电阻、故障位置等模拟量型的时变元件进行设置。 将根据用户意愿修改的时变元件称为人为性时变元 件,例如:为了模拟换流器可能发生的故障,在换流 器仿真电路中包含短路、断线、接地等人为性时变元 件,仿真电路如附录中图A1所示。

当网络中不含时变和非线性元件时,线性组合 法所采用的结构参数都是常数。当网络中存在时变 和非线性元件时,这些结构参数的取值也变为与时 间或电流/电压相关的函数,存在多种取值。由于 承担仿真任务的硬件的存储资源有限,当时变元件 和非线性元件达到一定的数量时,骨架型节点电压 法面临结构参数的存储问题。

# 2.2 关注区可变的仿真计算框架

当模拟某种电力系统现象时,需要某些人为性 时变元件发生变化;当模拟另一种电力系统现象时, 需要另外一些人为性时变元件发生变化。换言之, 在大部分时段内可将大部分人为性时变元件看作恒 定不变。利用这种特点,给子网络赋予动态可变的 关注标志,将人为性时变元件恒定不变的子网络称 为非关注子网络,将人为性时变元件需要发生变化 的子网络称为关注子网络。

对于非关注子网络而言,其人为性时变元件只 有一种状态,结构参数的取值数量不大,可以采用线 性组合法获取子网络的诺顿等效电路和状态变量; 对于关注子网络而言,允许人为设置有无故障、设备 的运行状态和负荷的大小,其结构参数的取值数量 很大,只能采用节点消去法获取子网络的诺顿等效 电路和状态变量。在节点消去法中可以预存节点导 纳之类的结构参数来减少仿真的计算量。由于关注 子网络的占比很小,前述骨架型节点电压法的优点 仍被保留。关注区可变的仿真计算框架见附录中 图 A2。

同一个子网络有2种不同的等效与求解方法, 按照 switch-case 分支结构设计仿真程序,需要很大 的程序存储空间,不适用于FRTDS。一种可行的方 法是:事先编制好若干个针对特定关注区的仿真计 算程序,当关注区发生变化时,先将对应的仿真计算 程序下载到备用程序存储器中,再通过切换命令将 备用程序存储器变为运行程序存储器,实现不同仿 真程序间的无缝切换。

# 3 关注区可变的FRTDS设计

# 3.1 基于指令流的FRTDS

FRTDS将完成某种运算所涉及的数据存储器地 址和选择字用规定的指令格式来描述,并将其保存 在程序存储器中。运算组件按照规定的工作频率从 程序存储器中取得指令,并将其传输给读控制器、写 控制器、选择控制器。读控制器通过多口读写电路 从数据存储器中取得运算数据,运算器按照选择控 制器给出的工作方式进行数值运算,由写控制器将 计算结果通过多口读写电路存储到数据存储器中。 该过程延绵不断,直到一个仿真步长结束再从头重 新开始。运算组件的具体结构见附录中图A3。

为了使运算核能够流水作业,在读控制器、写控制器、选择控制器中加入指令缓冲队列,用于对数据存储器地址和选择字进行延时输出。在硬件资源允许的情况下,搭建尽可能多的运算组件,使FRTDS 具备强大的并行计算能力。各运算组件并行工作, 通过运算组件中的直通线和公用数据区实现运算组件间的数据通信。

为了方便地从结构参数中读取当前值,可将其 视为数组,数组中每个元素代表结构参数的某个取 值。描述结构参数的信息保存在引导字中,引导字 包括结构参数的起始地址、影响字(由时变元件和非 线性元件的状态组成)地址、译码方式。FRTDS根据 引导字获取结构参数当前值的真实地址,具体过程 如图2所示,该间接寻址电路放在运算组件的读控 制器与程序存储器之间。



#### 图2 间接寻址示意图



FRTDS具有硬件在环功能。由于真实设备发出 的跳合闸信号、晶闸管触发信号等信息到达FRTDS 的时间并不确定,先将其集中在备用数据存储器中。 在每个仿真步长的起始时刻,将备用数据存储器变 为运算组件的运行数据存储器,将外部信息提供给 运算组件。运算组件的输出数据同样不能直接提供 给外围设备,先将输出数据集中在备用数据存储器 中,然后在每个仿真步长的起始时刻将备用数据存储器 中,然后在每个仿真步长的起始时刻将备用数据存 储器变为外围设备的运行数据存储器,保证外围设 备能够使用同一时刻的电压量和电流量。这种数据 存储器的乒乓工作方式提高了实时仿真平台的工作 效率。

FRTDS提供的图形化仿真软件包括仿真对象图 形化建模和运算任务指令级分配。仿真对象图形化 建模根据电气设备的特性及其连接关系,自动给出 具体的仿真计算过程。运算任务指令级分配根据运 算式中变量的位置,自动生成描述运算任务依赖关 系的有向无环图。在每一时钟节拍,在就绪的计算 任务中找出距离任务最晚安排时间的时间富裕量最 少的任务,计算其在所有运算组件中安排的成本,然 后将其安排在成本最小的运算组件中。重复该过程 直到所有就绪的计算任务都被安排或者运算组件不 能承担更多的计算任务为止。

#### 3.2 关注区仿真程序的无缝对接

仿真计算程序包括三方面内容:①采用线性组 合法求取子网络的诺顿等效电路、状态变量、输出变 量的程序;②采用节点消去法求取子网络的诺顿等 效电路、状态变量、输出变量的程序;③骨架型节点 电压法的形成程序和求解程序。为了节省程序的存 储空间并缩短程序的下载时间,将所有采用线性组 合法求取子网络的诺顿等效电路、状态变量、输出变 量的程序以及骨架型节点电压法的形成程序和求解 程序固定在程序存储器中,在任何时候都被执行;采 用节点消去法求取子网络的诺顿等效电路、状态变 量、输出变量的程序不固定在程序存储器中,当子网 络被关注时才被放入程序存储器中运行。为了叙述 方便,将所有子网络的线性组合法程序、骨架型节点 电压方程的形成程序和求解程序称为全程程序,将 子网络的节点消去法程序称为区间程序。 图3给出了一种串行化的仿真计算程序的无缝 对接方法。由于区间程序的计算结果能够覆盖全程 程序的计算结果,无需考虑线性组合法和节点消去 法计算结果的选择问题。但这种对接方法存在以下 2个问题:①区间程序和全程程序之间串联运行,不 能充分发挥FRTDS的并行计算能力;②乒乓数据存 储器的位置和空间大小很难决定,不利于实时仿真 平台的推广应用。



图3 串行化的仿真计算程序

Fig.3 Serial simulation program

图4给出了一种并行化的仿真计算程序的无缝 对接方法。将所有运算组件的程序存储区按相同的 方法划分为3段,首段和尾段为乒乓结构,中段为固 定结构。首段放置用节点消去法获取的关注子网络 诺顿等效电路程序和部分用线性组合法获取的所有 子网络诺顿等效电路程序,尾段放置用节点消去法 获取的关注子网络状态变量与输出变量程序和部分 用线性组合法获取的所有子网络状态变量与输出变 量程序。这种对接方法使得区间程序和部分全程程 序能够并列运行,尽可能地发挥了FRTDS的并行计 算能力。同时,乒乓结构数据存储器的选择可按最 大需求决定,且不会浪费乒乓结构数据存储器的存 储空间。



为了尽可能地发挥 FRTDS 的并行计算能力,必 须优化出放在乒乓结构数据存储器中的部分全程程 序。在所有获取关注区诺顿等效电路的程序中,将 同时满足计算量最大和串行度最长的程序称为首段 最大区间程序。如果不存在这样的程序,则将具有 串行度最长的程序设置为首段最大区间程序,且在 程序中加入无用的乘加运算语句,使其计算量在所 有程序中最大。尾段最大区间程序的定义类似,将 获取关注区诺顿等效电路程序变为获取关注区状态 变量和输出变量程序即可。将首段最大区间程序、 尾段最大区间程序、全程程序的执行语句安排到程 序数据存储器中,落在首段的全程程序的执行语句 属于首段伪区间程序,落在尾段的全程程序的执行 语句属于尾段伪区间程序。

改变关注区,将变化的首段区间程序和固定的 首段伪区间程序在首段范围内进行执行语句安排, 将变化的尾段区间程序和固定的尾段伪区间程序在 尾段范围内进行执行语句安排。由于流水线的缘 故,安排首段执行语句时要保证中段执行语句的读 人数据能够到达,安排尾段执行语句时要保证中段 执行语句的写出数据已经到达。若出现无法安排的 现象,则在首段或者尾段最大区间程序中再加入适 量的无用的乘加运算语句,重新确定首段伪区间程 序和尾段伪区间程序。图5为采用并行化设计仿真 计算程序时获取所有关注区指令的程序流程图。



在并行化的仿真计算程序的无缝对接方法中, 需要考虑线性组合法和节点消去法计算结果的选择 问题。子网络状态变量的求取和使用不在同一个仿 真步长内发生,子网络的输出变量在仿真计算程序 中只写不读,本文采用赋值语句级别的覆盖方法来 解决计算结果的选择问题。由于这种覆盖方法仅要 求节点消去法中状态变量和输出变量的赋值语句放 在线性组合法中状态变量和输出变量的赋值语句之 后,不会影响实时仿真平台的并行计算能力。子网 络诺顿等效电路的求取和使用在同一个仿真步长内 发生,使用诺顿等效电路参数时需制定相应的查询 方法进行选择。

# 3.3 结构参数和等效结果的查询方法

晶闸管、断路器、隔离刀闸等开关量时变元件有 0和1这2种状态,在仿真程序中经常用很大的电阻 表示0状态,用很小的电阻表示1状态。开关量时变 元件的状态和电阻值之间有对应的关系。故障接地 电阻、故障相间电阻等模拟量时变元件没有状态表 述,只有数值大小。当一个模拟量时变元件没有状态表 述,只有数值大小。当一个模拟量时变元件改变时, 不仅涉及多个不同类型的结构参数,而且涉及结构 参数中的每一个成员,难以保证通过外围设备在一 个仿真步长内修改所有相关的结构参数。将模拟量 时变元件也看作有2种状态,一种状态的值是模拟 量时变元件改变前的值,另一种状态的值是模拟量 时变元件改变后的值。在模拟量时变元件发生变化 前,先按照变化前、后的模拟量数值修改结构参数, 再改变影响字中模拟量时变元件的状态。将这种方 法称为伪开关量方法,具体过程如图6所示。



图6 伪开关量方法的具体过程

Fig.6 Specific process of virtual switching method

将全程程序的结构参数表称为全程参数表,将 区间程序的结构参数表称为区间参数表。在对模拟 量时变元件实施伪开关量方法时,不仅要改变区间 参数表,而且要改变全程参数表,区间参数表和全程 参数表都需要乒乓结构的数据存储器。为了节约 FPGA的数据存储器资源,区间参数表的数据存储器 采用嵌套的乒乓结构。内部乒乓用于实施伪开关量 方法,外部乒乓用于更改关注区。由于内部乒乓采 用局部修改方式,而外部乒乓采用整体更换方式,当 外部乒乓发生时需要将新的区间参数表同时下载到 内部乒乓的2套数据存储器中。内部乒乓的工作频 率与仿真步长一致,而外部乒乓操作只发生在关注 区被改变的时刻。

参数表按存储对象可分为线性组合法的结构参 数表、节点消去法的节点导纳参数表、诺顿等效电路 的等效电流源参数表和等效电导参数表。结构参数 的影响字与参数表之间是一对一的直接对应关系, 而节点导纳的影响字与参数表之间是多对一的映射 对应关系<sup>[16]</sup>。等效电流源的影响字为子网络关注标 志,采用直接对应方法对等效电流源的参数表进行 查询。等效电导的影响字由结构参数的影响字和子 网络关注标志组成。子网络关注时采用引导地址固 定偏移方式查询节点消去法等效电导参数表,子网 络非关注时采用直接对应方法查询线性组合法等效 电导参数表。等效电流源的参数表和节点消去法的 等效电导参数表需能读能写的数据存储单元,但无 需乒乓结构。

# 4 算例验证

# 4.1 实验平台与新版FRTDS的特点

天津大学智能电网教育部重点实验室研发的 FRTDS 是一种全电磁暂态实时仿真装置。FRTDS 与负责仿真程序下载和仿真设置的上位机之间采用 UDP 通信协议,与真实的数字化保护装置之间采用 IEC61850 通信协议,与自主开发的实验用控制器之 间采用 Xilinx 公司的 Aurora 通信协议。基于 FRTDS 的硬件在环实验平台如附录中图 A4 所示。

新、旧版 FRTDS 都采用 Xilinx 公司的 Virtex-7 FPGA VC709 开发板,运算组件的仿真步长均为 50 μs,工作频率均为200 MHz。新版 FRTDS 致力于 实现关注区可变的实时仿真方法,需要增加乘累加 运算器,并尽可能地扩大结构参数的存储能力。由 于 FPGA 的资源有限,新版 FRTDS 的并行计算能力 有所下降。表1给出了新、旧版 FRTDS 的结构参数 存储空间和基本运算式的并行计算能力。

表1 新、旧版FRTDS的性能

Table 1 Performance of new and old FRTDS

FRTDS	运算组件数	存储空间数量	基本运算式个数
新版	3	16384	24
旧版	4	4096	28

## 4.2 算例介绍与仿真规模验证

本文的仿真算例选用改造后的4机2区交直流混合电网,结构图见图7。整流侧交流母线的额定电压为345 kV,逆变侧交流母线的额定电压为230 kV,两侧换流母线上装有阻尼滤波装置和电容

无功补偿设备。送端电网与受端电网均以2台同步 发电机代替,通过变压器连接到交流母线上。直流 部分的结构及参数按照 CIGRE 直流输电系统标准 设计,整流器和逆变器都采用12 脉波的晶闸管换流 器。整流侧采用定电流控制,逆变侧采用恒电流控 制、低压限流控制以及熄弧角控制<sup>[17]</sup>。



图7 2区4机系统结构

Fig.7 Structure of 2-area 4-machine system

选取骨架节点,对算例系统进行子网络划分的 基本原则为:子网络要尽可能大,子网络线性组合法 的计算量要小于节点消去法的计算量,子网络结构 参数的存储量要在合理的范围内。由于发电机涉及 非人为性模拟量时变元件和坐标变换,其不参与子 网络划分,按照常规的计算方法对发电机进行等效 和求解。按照图7将算例系统划分为9个子网络,表 2给出了子网络线性组合法计算程序和节点消去法 计算程序的基本运算式个数和所需结构参数存储空 间数量。

#### 表2 子网络计算程序的基本运算式个数和存储空间数量

Table 2 Number of basic expression and storage

space for subnetworks' calculation program								
之网级	基本运算式个数		所需存储空间数量					
丁四珩	节点消去法	线性组合法	节点消去法	线性组合法				
Ι	3214	1 242	168	4256				
II	1613	712	84	2916				
Ш	2835	432	64	6144				
IV	2486	398	61	4608				
V	1 2 4 7	673	40	1 5 3 6				
VI	2486	432	64	4608				
VII	2835	398	61	6144				
VIII	1613	712	84	2916				
IX	3214	1242	168	4256				

由表2可以看出,线性组合法计算程序的基本 运算式个数比节点消去法计算程序要少得多,而线 性组合法计算程序所需结构参数存储空间比节点消 去法计算程序要大得多。

为了验证新版 FRTDS 比旧版 FRTDS 具有更大的仿真规模,在旧版 FRTDS 环境下采用节点消去法进行仿真计算,在新版 FRTDS 环境下始终将受端电网看作关注区进行仿真计算。通过在送端电网的发电机-变压器组出口处增加负荷出线来扩大仿真规模。表3给出了不同仿真规模下新、旧版 FRTDS 仿

真程序所需计算时间和结构参数存储空间数量。

# 表3 不同仿真规模下仿真程序所需计算时间和 结构参数存储空间数量

 Table 3 Computation time and storage space number

 of structural parameters required by simulation

program under different simulation scales

负荷	计算时间 / μs		结构参数存储空间数量	
出线数	旧版 FRTDS	新版 FRTDS	旧版 FRTDS	新版 FRTDS
1	36.2	25.7	934	7854
5	39.7	26.3	1 0 3 0	8 502
15	51.6	27.9	1270	10122
30	78.4	30.5	1630	12552
50	119.3	34.8	2110	16392

由表3可以看出,新版FRTDS的仿真规模相比 于旧版FRTDS有很大程度的提升。另外,旧版 FRTDS因计算能力问题限制了仿真规模的进一步扩 大,而新版FRTDS因结构参数存储空间数量问题限 制了仿真规模的进一步扩大。

# 4.3 仿真准确性验证

为了验证新版FRTDS仿真结果的准确性,将新版FRTDS的仿真结果与PSCAD仿真结果进行分析对比。

(1)晶闸管触发脉冲丢失故障。

在t=0.2s时设置逆变侧换流器晶闸管触发脉冲丢失,持续0.2s后清除故障。图8给出了基于新版FRTDS与PSCAD的逆变侧交流电流仿真波形。



图 8 触发脉冲丢失时的电流仿真波形 Fig.8 Simulative waveforms of current when triggering pulse losses

(2)逆变侧换流母线发生故障。

在*t*=0.2 s时设置逆变侧换流母线发生三相金属性接地故障,持续0.2 s后清除故障。图9给出了基于新版FRTDS与PSCAD的逆变侧交流电流仿真波形。

(3)发电机出口母线发生三相短路故障。

在t = 10 s时设置发电机 G<sub>3</sub>出口母线发生三相 短路故障,持续 0.1 s后清除故障。图 10 给出了基于 新版 FRTDS 与 PSCAD 的发电机 G<sub>3</sub>机端电压(标幺 值)仿真波形。



图9 逆变侧换流母线发生故障时的电流仿真波形

Fig.9 Simulative waveforms of current when fault occurs at inverter-side converter bus



图 10 发电机出口母线发生故障时的机端电压仿真波形 Fig.10 Simulative waveforms of generator terminal voltage when fault occurs at generator outlet bus

由图 8—10 可以看出,新版 FRTDS 的仿真波形 与 PSCAD 仿真波形大体上重合,且与实际状况相符 合;详细观察其局部放大图可发现,新版 FRTDS 的 仿真波形与 PSCAD 仿真波形之间有一定的误差,但 都非常小。综上可以认为新版 FRTDS 具有较高的 仿真精度和一定的仿真规模,有推广应用价值。

## 5 结论

为了在FRTDS中实现具有一定规模的交直流 混合电网的电磁暂态实时仿真,本文给子网络赋予 了动态可变的关注标志。对人为性时变元件发生作 用的关注子网络采用存储压力比较小的节点消去 法,对人为性时变元件不发生作用的非关注子网络 采用计算量少的线性组合法。按照关注区可变的仿 真计算方法,给出了并行化仿真计算程序的无缝对 接方法,综合考虑人为性模拟量时变元件的参数存 储问题,确定了结构参数动态替换的数据存储方法, 使所设计的FRTDS具备一定的通用性,便于后期 推广。

在未来的研究中,将在采用模块化多电平变流 器的交直流混合电网的实时仿真中应用关注区可变 的FRTDS;同时,从优化子网络划分方法的角度,考 虑进一步提高骨架型节点电压法的实用性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

### 参考文献:

- 石正,许寅,吴翔字,等.交直流混联电网系统保护策略校核与 辅助决策方法[J].电力自动化设备,2020,40(4):25-31.
   SHI Zheng, XU Yin, WU Xiangyu, et al. Assessment of system protection strategy and aided decision scheme for AC / DC hybrid power systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(4):25-31.
- [2] 董新洲,汤涌,卜广全,等.大型交直流混联电网安全运行面临 的问题与挑战[J].中国电机工程学报,2019,39(11):3107-3119.

DONG Xinzhou, TANG Yong, BU Guangquan, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3107-3119.

- [3] 董毅峰,王彦良,韩佶,等.电力系统高效电磁暂态仿真技术综述[J].中国电机工程学报,2018,38(8):2213-2231,2532.
   DONG Yifeng, WANG Yanliang, HAN Ji, et al. Review of high efficiency digital electromagnetic transient simulation technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2213-2231,2532.
- [4] 田芳,周孝信.交直流电力系统分割并行电磁暂态数字仿真方法[J].中国电机工程学报,2011,31(22):1-7.
   TIAN Fang,ZHOU Xiaoxin. Partition and parallel method for digital electromagnetic transient simulation of AC / DC power system[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(22):1-7.
- [5] ACEVEDO S. Efficient HVDC converter model for real time transients simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999,14(1):166-171.
- [6] 唐一果,郭希铮,张子钰,等. 基于实时仿真的 ADC 模型参数 优化方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):214-218,224.
  TANG Yiguo,GUO Xizheng,ZHANG Ziyu,et al. Parameter optimization method of ADC model based on real-time simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 214-218,224.
- [7]杨洋,肖湘宁,王昊,等.电力系统数字混合仿真技术综述及展望[J].电力自动化设备,2017,37(3):203-210,223.
   YANG Yang,XIAO Xiangning,WANG Hao, et al. Review and prospect of power system digital hybrid simulation technology
   [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3):203-210,223.
- [8] 郭琦.交直流混联电网运行控制实时仿真技术研究[J].南方 电网技术,2017,11(3):59-64.
   GUO Qi. Research on real-time simulation technology of operation control of AC & DC hybrid power system[J]. Southern Power System Technology,2017,11(3):59-64.
- [9]朱艺颖,于钊,李柏青,等.大规模交直流电网电磁暂态数模混 合仿真平台构建及验证(一)整体构架及大规模交直流电网仿 真验证[J].电力系统自动化,2018,42(15):164-170.
  ZHU Yiying,YU Zhao,LI Baiqing, et al. Construction and validation of electromagnetic transient digital-analog hybrid simulation platform for large-scale AC / DC power grids part one general configuration and simulation validation of large scale AC / DC power grids[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(15):164-170.
- [10] 訾鹏,李轶群,谭贝斯,等.大电网仿真工具现状及其在华北 电网推广应用的思考[J].电力自动化设备,2019,39(9): 199-205.

ZI Peng,LI Yiqun,TAN Beisi, et al. Current situation of largescale power grid simulation tools and their popularization and application in North China Power Grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 199-205.

218

- [11] 李鹏,王智颖,王成山,等. 基于多FPGA的有源配电网实时仿真器并行架构设计[J]. 电力系统自动化,2019,43(8):174-182.
  LI Peng, WANG Zhiying, WANG Chengshan, et al. Design of parallel architecture for multi-FPGA based real-time simulator of active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8):174-182.
- [12] LIU J D,DINAVAHI V. A real-time nonlinear hysteretic power transformer transient model on FPGA[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7):3587-3597.
- [13] 王成山,丁承第,李鹏,等. 基于 FPGA 的光伏发电系统暂态实时仿真[J]. 电力系统自动化,2015,39(12):13-20.
  WANG Chengshan, DING Chengdi, LI Peng, et al. FPGA-based real-time transient simulation of photovoltaic generation system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12):13-20.
- [14] ZHANG Bingda, FU Shaowen, JIN Zhao, et al. A novel FPGAbased real-time simulator for micro-grids [J]. Energies, 2017, 10(8):1239.
- [15] 于浩,李鹏,王成山,等.基于状态变量分析的有源配电网电 磁暂态仿真自动建模方法[J].电网技术,2015,39(6):1518-1524.

YU Hao, LI Peng, WANG Chengshan, et al. Automated model generation of active distribution networks based on state-

space analysis for electromagnetic transient simulations[J]. Power System Technology, 2015, 39(6):1518-1524.

- [16] ZHANG Bingda, HU Ruizhao, TU Sijia, et al. Modeling of power system simulation based on FRTDS[J]. Energies, 2018, 11 (10):2749.
- [17] 祝新驰,李海锋,黄炟超,等.基于触发角变化特性的高压直流 线路纵联保护[J].电力自动化设备,2020,40(6):163-171.
   ZHU Xinchi,LI Haifeng,HUANG Dachao, et al. Pilot protection of HVDC power transmission lines based on variation characteristics of firing angle[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(6):163-171.

#### 作者简介:



张炳达(1959—),男,江苏常熟人,教 授,博士研究生导师,主要研究方向为电力 系统实时仿真、电力系统的优化运行与控制 (E-mail:bdzhang@tju.edu.cn);

靳朝(1992—),男,山东德州人,博 士研究生,主要研究方向为电力系统实时仿 真、交直流混联系统运行与控制(E-mail: 1017234013@tju.edu.cn)。

张炳达

(编辑 陆丹)

## Real-time simulation method and platform with variable focus areas

ZHANG Bingda, JIN Zhao, ZHU Junjie, ZHANG Jia

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The real-time simulation of AC / DC hybrid power grid should not only consider the switching characteristics of power electronic equipment, but also ensure to adapt to larger-scale power grid, which faces a lot of difficulties in the actual projects. In order to ensure the practicability of the essential node voltage method, a dynamic variable attention mark is given to the sub-network. The node elimination method with low storage pressure is adopted in the focus sub-network, while the linear grouping method with less computation is adopted in the non-focus sub-network. In the Virtex-7 FPGA VC709 development board of Xilinx Company, the shortage of FPGA(Field Programmable Gate Array) resources is solved by using the seamless parallel simulation program docking method and the flexible structural parameter query method, and a real-time digital simulation platform with variable focus area is designed. Taking a typical AC / DC hybrid power grid as the example, the feasibility of the proposed method and the effectiveness of the developed platform are verified.

Key words: AC / DC hybrid power grid; real-time simulation; essential node voltage method; variable focus areas; FPGA





Fig.A3 Structure of arithmetic components



图 A4 FRTDS 硬件在环结构 Fig.A4 Hardware in the loop structure of FRTDS