

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201460

# 基于PSCAD/EMTDC的特高压直流输电系统 并行仿真研究与应用

胡永昌, 李泰, 曹森, 苏进国, 张艳浩, 李艳梅

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 为提升特高压直流输电系统仿真效率, 提出了基于PSCAD/EMTDC的多核并行仿真方法。通过模型拆分和多进程并行运算, 该方法解决了大规模直流系统离线电磁暂态仿真无法运行或者效率低的问题。首先, 介绍了一次系统和控制保护装置的高精度建模方法和原则。然后, 针对一次系统, 在长线路自然解耦的基础上, 提出一种基于主回路现有元件的等效短线路解耦方法, 解决了在无线路或者短线路情况下分网并行的接口问题, 并制定了一次系统解耦分网方案。最后, 为解决多仿真进程并行之间的通信和同步问题, 设计了基于共享内存的多进程并行方法。以雁门关-淮安特高压直流工程为例搭建多核并行模型, 通过对比试验验证了该并行方法可大大提升仿真效率, 且不会影响仿真精度。

**关键词:** 特高压直流输电; PSCAD/EMTDC; 短线路解耦; 多进程并行; 模型验证

## Research and application of parallel simulation of a UHVDC system based on PSCAD/EMTDC

HU Yongchang, LI Tai, CAO Sen, SU Jinguo, ZHANG Yanhao, LI Yanmei

(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

**Abstract:** To improve the simulation efficiency of a UHVDC system, a multi-core parallel simulation method based on PSCAD/EMTDC is proposed. Through model splitting and multi process parallel operation, this method solves the problem of inability to run or low efficiency in the offline electromagnetic transient simulation of a large-scale DC system. First, high-precision modeling methods and principles of primary systems and control and protection devices are introduced. Then, for the primary system, based on the natural decoupling of long lines, an equivalent short line decoupling method based on the existing components of the main circuit is proposed. This solves the problem of parallel interfaces in the case of no line or short lines, and the decoupling and network division scheme of the primary system is formulated. Finally, in order to solve the problem of communication and synchronization between multi simulation processes, a multi process parallel method based on shared memory is designed. Taking the Yanmenguan-Huaian UHVDC project as an example, a multi-core parallel model is built. Through comparative experiments, it is verified that the parallel method can greatly improve simulation efficiency without affecting accuracy.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China "Research and Application of Protection and Regulation Auxiliary Check Technology based on Multi-Scenario Simulation of UHVDC Converter Station" (No. SGJ0000DKJS1900863).

**Key words:** UHVDC; PSCAD/EMTDC; short circuit decoupling; multi-process parallel; model validation

## 0 引言

近年来我国特高压直流输电技术取得了重大进步, 实现了直流输电电压、电流的大幅提升, 输送

容量和送电距离得到了突破<sup>[1-6]</sup>, 已建成了±800 kV 云南-广东、向家坝-上海、锦屏-苏州、哈密-郑州、宜宾-金华、灵州-绍兴、酒泉-湖南、雁门关-淮安、锡盟-泰州等特高压直流输电工程。随着越来越多特高压直流输电工程的建成投运, 电网结构变得日益复杂, 为提升直流系统调试、运维能力和水平, 保证电网运行安全, 需采用有效的仿真手段对直流系统的运行特性进行全面深入研究<sup>[7-12]</sup>。

**基金项目:** 国家电网有限公司总部指南科技项目资助“基于特高压直流换流站多场景仿真的保护及调控辅助校核技术研究和应用”(SGJ0000DKJS1900863)

目前, 特高压直流仿真及故障模拟多依赖于 RTDS。但是 RTDS 造价昂贵, 且需连接实际的控保装置, 占地面积较大, 较适用于直流控保装置的测试场景, 不适合提供便捷化仿真支撑和培训使用<sup>[13-15]</sup>。PSCAD/EMTDC 作为目前世界上广泛应用的电磁暂态仿真软件, 具有丰富的电力系统元件库和强大的用户自定义功能, 基于其搭建的全数字模型可为特高压直流输电系统研究提供更为经济便捷的仿真支撑<sup>[16-21]</sup>, 但为了保证仿真准确性模型必须详细且贴近工程实际, 单纯地提升模型的详细度必然会降低仿真速度。因此, 同时满足用户对仿真速度和精度的要求, 开发基于 PSCAD/EMTDC 的并行仿真方法显得非常必要。

文献[22]介绍了基于实际工程的直流输电控制保护模型设计方法, 并说明可进行多 CPU 并行仿真, 但该方案只局限于直流二次控制保护部分, 且只能在 Hypersim 特定的硬件环境下提升仿真速度。文献[23]介绍了基于 PSCAD/EMTDC 的多端柔性直流输电系统并行仿真计算方法, 但只适用于多端直流系统通过长传输线进行解耦分网以提升仿真速度, 对于两端系统提升速度有限, 对于短线路或者无线路情况更是无法适用, 且没有关注到控制保护装置并行仿真问题。文献[24]提出了接入多直流控制保护的大规模交直流电网数模混合仿真平台建设技术方案, 方案中简单说明了可在 Hypersim 软件中通过自带解耦元件对直流一次部分进行分网并行处理以提升仿真速度, 并未分析解耦分网原理, 且只局限于 Hypersim 大规模数模混合仿真环境, 不适用于 PSCAD/EMTDC 全数字仿真建模。

本文提出了一种基于 PSCAD/EMTDC 的特高压直流系统并行仿真方法, 对直流输电一、二次系统仿真模型进行子任务拆分和并行运算, 充分利用高性能计算机的多核处理能力, 提升仿真效率。通过研究传统长线路解耦算法, 提出了等效短线路解耦方法, 弥补了一次系统模型在无线路或短线路下无法分网的不足。建立基于共享内存的多进程并行机制, 解决多个仿真进程间的数据交互和同步问题。以雁门关-淮安 ±800 kV 特高压直流输电工程为例, 搭建了直流系统全数字仿真模型, 实现模型多核并行仿真, 仿真速度得到大大提高, 并验证了并行仿真建模方法的准确性。

## 1 模型搭建方法

### 1.1 一次系统建模

针对一次系统, 依据实际工程主接线图和主回路参数等信息, 对主要直流场设备进行仿真建模,

模型参数完全采用工程设计参数, 使其外部特性与特高压直流换流站一次设备高度一致。在保证模型准确度的前提下使模型运行速率达到最优, 需遵循以下原则。

1) 对于交流系统的建模, 采用交流电压源串联 RLC 电路进行等值, 交流电压、短路容量等参数与实际工程一致。

2) 对于交流滤波器和直流滤波器的建模, 应按照实际工程设计结构、组数和参数, 使用 PSCAD/EMTDC 自带元件进行详细搭建。

3) 为减少仿真节点数, 所有接地刀闸和部分隔离刀闸将不在 PSCAD/EMTDC 中建模, 集中在现场层模拟器模块中进行数字化模拟。

4) 为降低计算负荷, 减少使用单独的电压、电流传感器模块, 尽量采用主回路元件模型的输出测点代替。

### 1.2 控制保护装置建模

实际工程控制保护系统仿真建模一般不考虑冗余和三取二等相关功能, 单套系统仍有多达 40 余台控制保护装置, 手动建模工作量大且极易出错。为提升模型的准确性和降低建模难度, 将每台实际控制保护装置在仿真模型中对应一个用户自定义模块, 采用与实际工程一致的层次结构构建控制保护模型。控制保护装置仿真建模方案如图 1 所示。

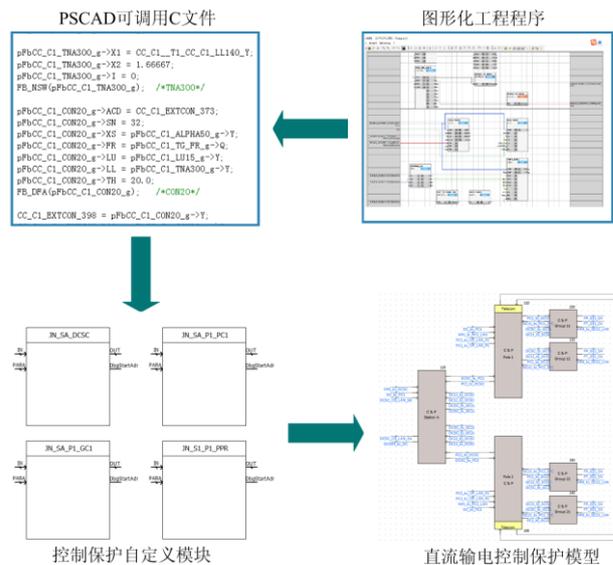


图 1 控制保护装置仿真建模方案

Fig. 1 Simulation modeling scheme of control and protection devices

首先, 直接将工程程序转化为 PSCAD/EMTDC 仿真可识别代码, 同时植入任务调度、FPGA 中软件算法、脉冲触发等底层硬件功能的等效代码; 然

后, 搭建对应的自定义模块, 通过入口函数调用完成物理装置向“虚拟装置”的无缝转换; 最后, 将控制保护模型之间及与一次系统模型之间的通信环节简化为通过 Windows 共享内存进行直接数据交互, 从而构建整个直流系统模型, 最终实现对整个系统特性的精准模拟。

## 2 一次系统解耦分网

### 2.1 长线路解耦方法

PSCAD/EMTDC 通常使用的一次系统解耦分网方法是基于长距离输电线路解耦算法, 对于采用贝杰龙(Bergeron)模型的直流长输电线路, 可简化为不考虑参数随频率变化的无损单相分布参数线路<sup>[25]</sup>。

假设线路单位长度的电感和电容为  $L_0$ 、 $C_0$ , 则线路特征阻抗  $Z_c$  和电磁波在线路上的传播速度  $v$  分别为

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (1)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad (2)$$

假设线路的长度为  $l$ , 则电磁波从一端传播到另一端的时间  $\tau$  为

$$\tau = l/v = l\sqrt{L_0 C_0} \quad (3)$$

通过对单相分布参数线路的波动方程求解和推导, 可得两端暂态等值计算公式为

$$i_k(t) = \frac{1}{Z_c} u_k(t) + I_k(t-\tau) \quad (4)$$

$$I_k(t-\tau) = -\frac{1}{Z_c} u_j(t-\tau) - i_j(t-\tau) \quad (5)$$

$$i_j(t) = \frac{1}{Z_c} u_j(t) + I_j(t-\tau) \quad (6)$$

$$I_j(t-\tau) = -\frac{1}{Z_c} u_k(t-\tau) - i_k(t-\tau) \quad (7)$$

式中:  $i_k(t)$ 、 $i_j(t)$  分别为  $t$  时刻线路  $k$ 、 $j$  端的注入电流;  $u_k(t)$ 、 $u_j(t)$  分别为  $t$  时刻线路  $k$ 、 $j$  端的端口电压;  $I_k(t)$ 、 $I_j(t)$  分别为  $t$  时刻线路  $k$ 、 $j$  端的受控电流源。

图 2 所示为单相分布参数线路的两端等效模型。由图 2 可知, 其分布参数的波过程可转化为仅含电阻和电流源的两端等值电路, 两端没有直接拓扑联系, 可以看作两个相互独立的网络, 线路两端的电磁联系可由  $t-\tau$  时刻两端电压、电流相关等值电流源计算得到。

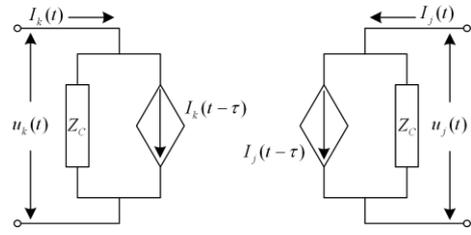


图 2 单相分布参数线路的两端等效模型

Fig. 2 Two-end equivalent model of single-phase distributed parameter line

由上述可得, 当仿真步长  $T_s$  小于电磁波在线路上的传递时间  $\tau$  时, 每个仿真时间点上线路两端的子网络可自然解耦, 两端电气网络可分核并行计算。

但基于长线路解耦算法对线路的长度有严格的要求:

$$l \geq T_s \cdot v \quad (8)$$

假如电磁波在线路上的传输速度为光速  $v = 3 \times 10^5 \text{ km/s}$ , 仿真步长  $T_s = 50 \times 10^{-6} \text{ s}$ , 可得

$$l \geq 15 \text{ km} \quad (9)$$

因此, 一般情况下满足自然解耦条件的线路长度必须大于 15 km, 线路长度的要求限制了该解耦方法的应用场景。

### 2.2 等效短线路解耦方法

对于两端特高压直流输电工程, 只利用送、受端之间的长距离直流输电线路将一次系统拆分成两个子网络, 对仿真速度的提升远远不够, 需开发一种新型解耦分网方法, 使解耦地点的选择更加的灵活多样。

图 3 所示特高压直流输电工程单极主回路接线图中, 换流变压器存在一定的漏磁电感, 交流滤波器中存在电容型滤波器小组, 如图 4—图 6 可提取出一部分电容和漏感转换为  $\pi$  型电路, 而后等效替换成一条 1 m 长度的贝杰龙型线路, 若该线路上行波传递时间  $\tau$  大于仿真步长  $T_s$  时, 电气网络可通过该短线路解耦。为避免取出换流变漏感过大对系统暂态特性产生影响, 从而导致分核并行仿真模型准确度降低, 现选取一整组的电容型交流滤波器和对应的部分换流变漏感等效为线路解耦元件。同时, 直流极母线、中性母线上存在平波电抗器和冲击电容器, 将平波电抗和一部分冲击电容等效替换成一条 1 m 长的贝杰龙型线路, 同样该线路上行波传递时间大于仿真步长时, 网络可通过该短线路解耦。

对于等效的短线路, 为满足解耦条件, 电磁波在该线路上的传输时间为

$$\tau = kT_s \quad (10)$$

式中:  $k \geq 1$ ;  $T_s$  为仿真步长。

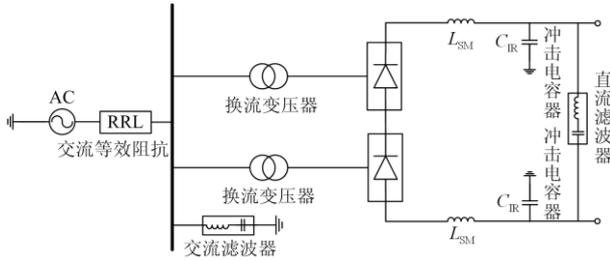


图 3 原始电路

Fig. 3 Original circuit

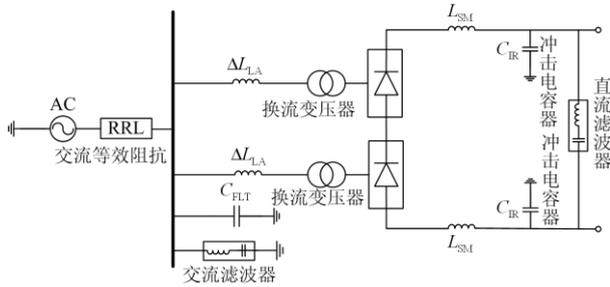


图 4 提取电容、电感后等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit after extracting capacitance and inductance

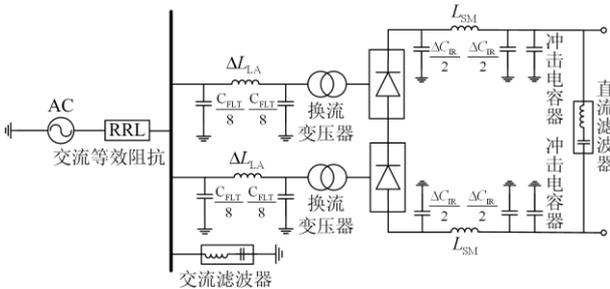


图 5 π 型等效电路

Fig. 5 π type equivalent circuit

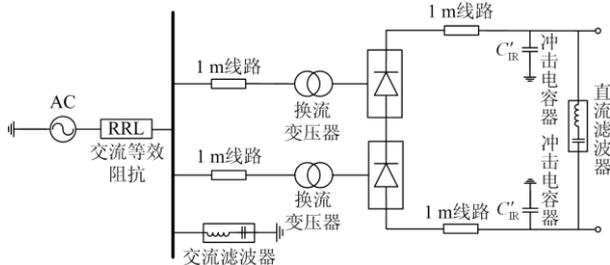


图 6 1 m 短线路替代后等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit after using 1 m short line

由此可推导出从换流变取出的部分漏磁感抗的标么值  $X\%$ 。

$$l\sqrt{\Delta L_{LA} \cdot \frac{C_{FLT}}{n}} = kT_s \quad (11)$$

$$\Delta L_{LA} = \frac{n(kT_s)^2}{C_{FLT} \cdot l^2} \quad (12)$$

$$X\% = \frac{\omega \cdot \Delta L_{LA}}{u_{AC}^2 / S_{TA}} = \frac{n \cdot S_{TA} \cdot \omega (kT_s)^2}{C_{FLT} \cdot l^2 \cdot u_{AC}^2} \quad (13)$$

式中:  $n$  为单个换流站换流变压器个数;  $\omega$  为角频率;  $\Delta L_{LA}$  为提取换流变压器部分漏电感值;  $S_{TA}$  为换流变压器容量;  $l$  为线路长度;  $C_{FLT}$  为提取出电容型交流滤波器小组的电容量;  $u_{AC}$  交流母线电压额定值。

同样可计算出取出的部分冲击电容值  $\Delta C_{IR}$ 。

$$l\sqrt{L_{SM} \cdot \Delta C_{IR}} = kT_s \quad (14)$$

$$\Delta C_{IR} = \frac{(kT_s)^2}{l^2 \cdot L_{SM}} \quad (15)$$

式中,  $L_{SM}$  为平波电抗器电感值。

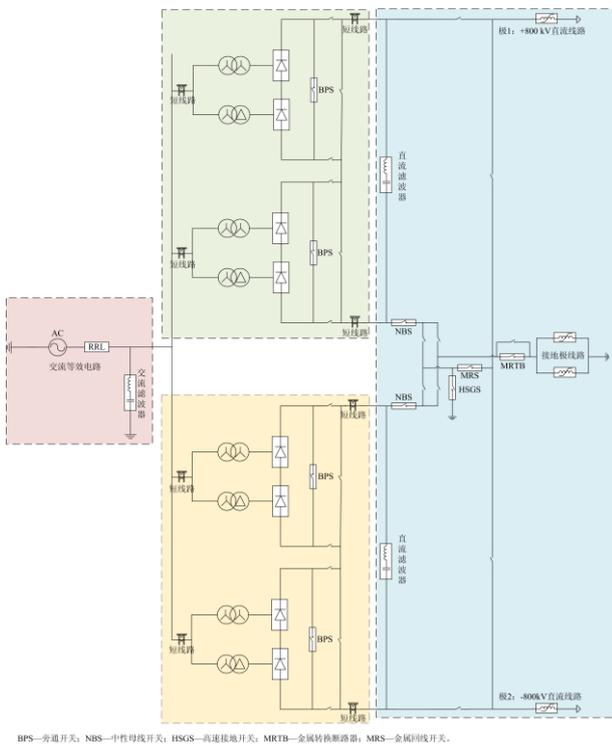
上述基于短线路解耦的分网方法充分利用主回路中已有的元件等效成 1 m 短线路再进行解耦, 不改变元件参数和网络结构, 对系统稳态、暂态特性影响极小。解决了在短线路、无线路情况下分网并行的接口问题, 结合长线路解耦方法, 为直流系统一次系统解耦分网提供了更多的解决方案。

### 2.3 一次系统分网方案

基于上述两种解耦方法, 将整个直流系统一次部分通过直流输电线路和等效短线路分割成 8 个子网络, 图 7 为整流站一次系统模型解耦分区图, 其中红色为整流站交流区设备, 绿色为整流站极 1 区设备。黄色为整流站极 2 区设备, 蓝色为整流站双极区设备, 逆变站 4 个分区与整流站相同。使用 PSCAD/EMTDC 中线路模型的 ENI 交互接口, 将不同子网络连接组成一个仿真集并行运算, 每个子网络具有独立的仿真进程, 生成独立的可执行文件分配到单独的处理器核心上执行, 充分利用高性能计算机多核并行处理能力, 以此大大提高仿真速度。

### 3 多进程并行方法

对于控制保护装置仿真, 去除冗余装置后主要由 40 多个控制保护模块组成, 它们之间并无耦合关系, 只有信号交互, 在仿真步长为  $50 \mu s$  的应用条件下, 并行计算带来的信号传输延时对控制保护逻辑的影响可以忽略。如图 8 所示将控制保护装置模型和一次系统模型拆分后, 以计算负荷为标准平均分配到多个仿真子任务中, 通过 PSCAD/EMTDC 的仿真集运算即可实现多核并行, 但分核并行带来的新问题是多个仿真进程间的通信和同步。



BPS—旁通开关; NBS—中性母线开关; HSGS—高速接地开关; MRTB—金属旋转断路器; MRS—金属母线开关。

图 7 整流站一次模型解耦分区图

Fig. 7 Decoupling scheme of rectifier station primary model

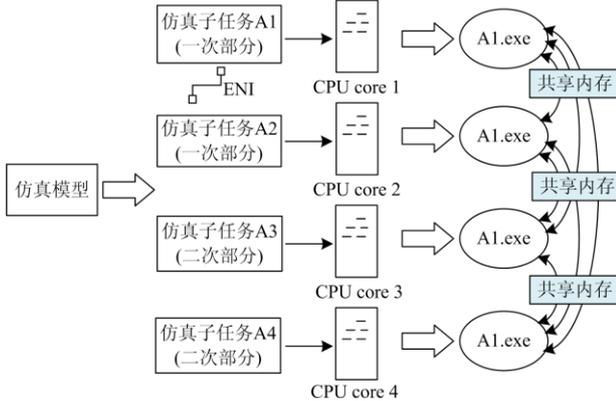


图 8 多核并行方案

Fig. 8 Multi-core parallel scheme

多进程间通信方式有管道、消息队列、信号量、共享内存、Socket、Streams 等，其中共享内存方式是效率最高的通信方式。本文采用共享内存读写方式进行仿真进程间的数据交互，但由于 Windows 系统中多进程执行先后顺序具有不确定性，为保证单个仿真进程读取其他进程数据的采样率不变，必须有一套读写互斥机制。可采用双缓存交换读写互斥机制，实现方法是每个进程分配两片共享内存区域，两片区域都可读写，同一时间一片区域用于读，另一片区域用于写，每个步长交换读和写的共享内存区域，使得采样率不变。

同时，并行计算时多进程间需要一套同步机制。常用的同步机制有临界区、互斥区、事件、信号量等，其中信号量机制更适合于多个进程间的同步与互斥。该方式为：在每个步长、每个仿真进程执行完毕后发信号给主进程，主进程在收到每个进程的结束信号后发送其他进程在该步长下的开始信号。图 9 为多进程并行同步机制流程图。

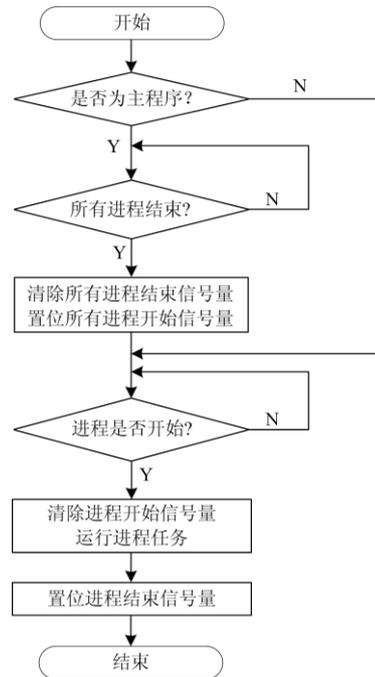


图 9 多进程并行同步机制流程图

Fig. 9 Flow chart of multi-process parallel synchronization mechanism

## 4 仿真试验

### 4.1 模型搭建

以 ±800 kV 雁门关—淮安特高压直流工程为例，基于 PSCAD/EMTDC 平台，搭建直流输电工程全数字仿真模型，包括一次系统、人机接口装置、控制保护装置及现场层模拟装置模型。其中，一次系统模型参数按照工程主回路参数配置；人机操作接口采用实际工程运行人员监控系统，与 PSCAD 通过共享内存进行数据交换，可同步监控整个直流系统模型；控制保护模型与实际装置一一对应，不考虑冗余，采用单套系统配置。单个换流站的仿真模型逻辑结构如图 10 所示。

### 4.2 模型分核并行

为提升仿真速度，根据上述分核并行方案，使用处理器为 Intel Xeon Gold 6234 @ 3.3 GHz (12 核 24 线程)、内存为 64 GB 的仿真计算机，将搭建的工程模型拆分为 24 个仿真子任务，每个子任务分配

在单独的处理器线程上进行并行运算。模型多核并行监视视图如图 11 所示, 左边为模型仿真子任务树, 右边为模型多核并行时 CPU 资源监视图。

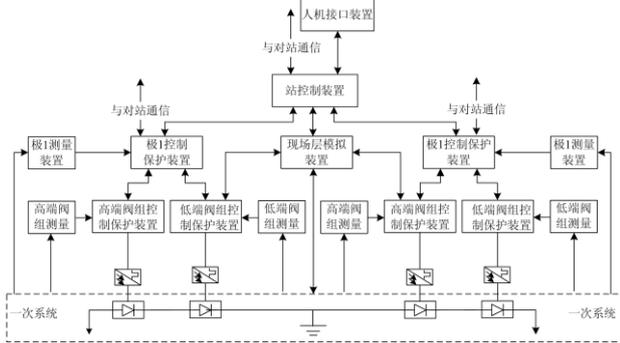


图 10 仿真模型逻辑结构图

Fig. 10 Simulation model logical structure diagram

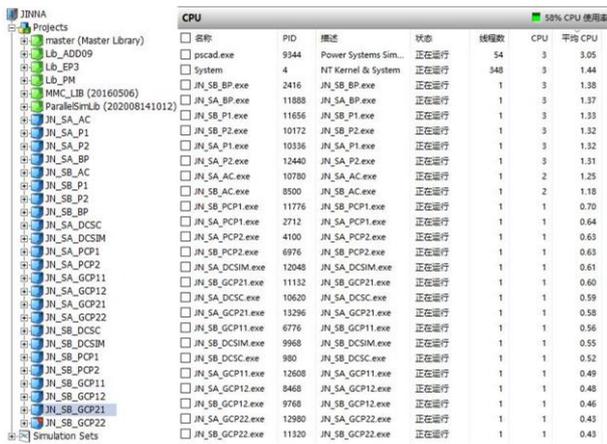


图 11 多核并行监视图

Fig. 11 Multi-core parallel monitoring diagram

其中仿真子任务 JN\_SA\_AC、JN\_SA\_P1、JN\_SA\_P2、JN\_SA\_BP 对应整流站一次系统交流区、极 1 区、极 2 区、双极区设备模型; JN\_SB\_AC、JN\_SB\_P1、JN\_SB\_P2、JN\_SB\_BP 对应逆变站一次系统交流区、极 1 区、极 2 区、双极区设备模型; JN\_SA\_DCSC、JN\_SA\_DCSIM、JN\_SA\_PCP1、JN\_SA\_PCP2、JN\_SA\_GCP11、JN\_SA\_GCP12、JN\_SA\_GCP21、JN\_SA\_GCP22 对应整流站站控、现场层模拟器、极 1 控制保护、极 2 控制保护、极 1 高端阀组控制保护、极 1 低端阀组控制保护、极 2 高端阀组控制保护、极 2 低端阀组控制保护设备模型; JN\_SB\_DCSC、JN\_SB\_DCSIM、JN\_SB\_PCP1、JN\_SB\_PCP2、JN\_SB\_GCP11、JN\_SB\_GCP12、JN\_SB\_GCP21、JN\_SB\_GCP22 对应逆变站站控、现场层模拟器、极 1 控制保护、极 2 控制保护、极 1 高端阀组控制保护、极 1 低端阀组控制保护、极 2 高端阀组控制保护、极 2 低端阀组控制保护设备模型。

### 4.3 试验对比

#### 1) 仿真速度对比测试

以一项仿真时间为 30 s 仿真步长为 50 μs 的仿真试验为对象, 对比模型在单核串行方式和分核并行方式下的仿真运行时间, 结果如表 1 所示, 分核并行方式比单核串行方式仿真速度加快 7.54 倍。

表 1 串行和并行仿真速度对比结果

Table 1 Comparison results of serial and parallel simulation speed

运算方式	仿真试验	执行时间/s	加速
单核串行	单核单进程	632.8	N/A
分核并行	24 进程(12 核 24 线程)	83.9	7.54×

#### 2) 仿真波形对比测试

为验证分核并行方案的准确性, 对串行和并行两种运算方式下的典型试验波形进行对比和分析。试验波形中, 蓝色波形  $U_{dL\_OC}$ 、 $I_{dNC\_OC}$ 、 $\alpha_{OC}$ 、 $U_{A\_OC}$ 、 $U_{B\_OC}$ 、 $U_{C\_OC}$  分别为单核串行仿真试验的直流线路电压、直流中性母线电流、触发角、交流母线 A 相电压、交流母线 B 相电压、交流母线 C 相电压; 红色波形  $U_{dL\_MC}$ 、 $I_{dNC\_MC}$ 、 $\alpha_{MC}$ 、 $U_{A\_MC}$ 、 $U_{B\_MC}$ 、 $U_{C\_MC}$  为多核并行仿真试验的直流线路电压、直流中性母线电流、触发角、交流母线 A 相电压、交流母线 B 相电压、交流母线 C 相电压。

#### (1) 阶跃响应试验

试验工况: 功率正送、双极双阀组运行, 双极功率 800 MW, 进行电流阶跃响应试验。直流电流阶跃量为 400 A, 阶跃时间持续 500 ms, 单核串行试验与多核并行试验波形对比见图 12。

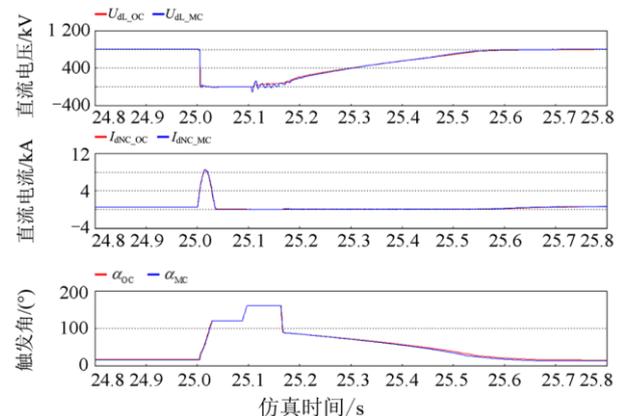


图 12 电流阶跃响应试验

Fig. 12 Current step response test

从图 12 和表 2 可以看出, 以单核串行试验为基准, 多核并行试验的上阶跃响应时间误差为 2.3%, 下阶跃响应时间误差为 2.8%, 电流最大值误差为

0.02%，电流最小值误差为 1.7%，电压最大值误差为 0.09%，电压最小值误差为 0.03%。

表 2 电流阶跃响应试验结果

Table 2 Current step response test results

电流阶跃	串行仿真	并行仿真	误差
上阶响应时间	87 ms	85 ms	2.3%
下阶响应时间	141 ms	137 ms	2.8%
电流最大值	957.8 A	957.6 A	0.02%
电流最小值	433 A	440.3 A	1.7%
电压最大值	811.8 kV	812.5 kV	0.09%
电压最小值	788.3 kV	788.08 kV	0.03%

(2) 交流接地故障试验

试验工况：功率正送、双极双阀组运行，双极功率 800 MW，进行交流接地故障试验。

故障位置为淮安站交流母线 C 相金属接地，故障时间为 100 ms、接地电阻为 0.1 Ω。该工况下单核串行试验与多核并行试验波形对比见图 13。

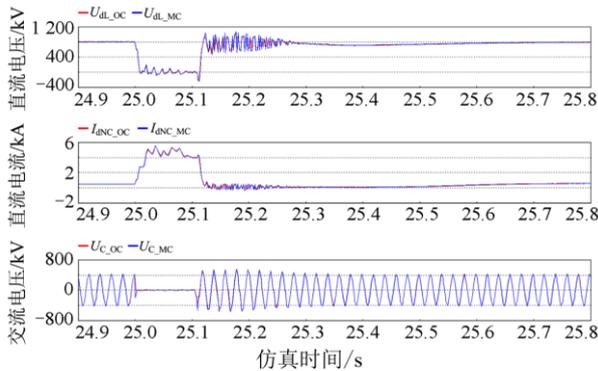


图 13 逆变站交流单相接地故障试验

Fig. 13 AC single-phase ground fault test in inverter station

故障开始后，逆变站发生连续换相失败，电压降为 0 左右，电流突然上升，保护动作增加熄弧角参考值 10°，故障结束后，电压电流振荡恢复。故障期间，串行仿真波形和并行仿真波形的电流最大值分别为 5 502.3 A、5 576 A，误差为 1.34%；直流电压恢复时，最大值分别为 987.6 kV、1 013 kV，误差为 2.6%。故障后达到稳态时，直流电流、电压分别为 551.8 A、550.3 A 和 787.9 kV、789.5 kV，误差分别为 0.27%、0.2%。

故障位置为淮安站交流母线三相金属接地，故障时间为 100 ms、接地电阻为 0.1 Ω。该工况下单核串行仿真试验与多核仿真试验波形对比见图 14。

故障期间，串行仿真波形和并行仿真波形的电流最大值分别为 6 088.7 A、6 290.7 A，误差为 3.3%；直流电压恢复时，最大值分别为 1 355.5 kV、1 404.5 kV，误差为 3.6%。故障后达到稳态时，直

流电流、电压分别为 758.2 A、759.6 A 和 563.7 kV、561.6 kV，误差分别为 0.18%、0.37%。

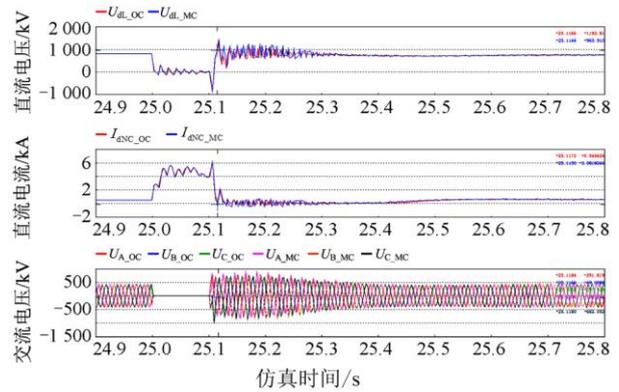


图 14 逆变站交流三相接地故障试验

Fig. 14 AC three-phase ground fault test in inverter station

(3) 直流线路接地故障

试验工况：功率正送、双极双阀组运行，双极功率 800 MW，进行直流线路接地故障试验。

故障位置为极 1 直流线路中点处金属接地，故障时间为 100 ms、接地电阻为 0.1 Ω。该工况下单核串行试验与多核并行试验波形对比见图 15。

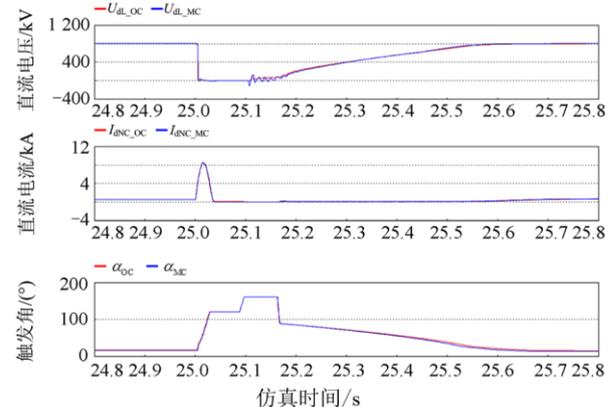


图 15 极 1 直流线路中点接地故障试验

Fig. 15 Ground fault test at the midpoint of pole 1 DC line

故障开始后，经过 150 ms 的去游离时间，控制系统进入重启过程，串行仿真和并行仿真试验的电流最大值分别为 8 454.8 A、8 529.9 A，误差为 0.88%；直流电压恢复时，最大值分别为 786.2 kV、791.7 kV，误差为 0.69%。故障后达到稳态时，直流电流、电压分别为 622.5 A、625.8 A 和 798 kV、799.9 kV，误差分别为 0.53%、0.23%。

通过分析试验(1)–(3)的结果发现，由于多核并行造成仿真子任务执行顺序不确定，以及短线路解耦需改变个别主回路元件位置，会造成试验(2)中分

核后交流故障恢复期间直流电压、电流振荡频率和幅值的少许差别,但总体上波形变化趋势和幅值吻合度非常高,稳态误差在 1% 以内,暂态误差也保持在 4% 以内,可认为单核串行和多核并行的仿真结果是一致的,分核并行方法对模型的准确性影响可忽略不计。

## 5 结语

考虑现有特高压直流输电离线电磁暂态仿真多采用串行运算结构,本文提出了基于 PSCAD/EMTDC 的分核并行仿真方法,通过模型拆分和多进程并行,解决了大规模精细化运算造成仿真效率低的问题。提出的等效短线路解耦法,弥补一次模型在无线路或短线路下无法分网的不足,使一次系统模型拆分更加多样、彻底。提出了以共享内存通信和信号量同步为主要内容的多进程并行方法,解决了多个仿真进程间的数据交互和同步问题。以雁门关-淮安特高压直流输电工程为例,分别搭建 PSCAD/EMTDC 单核串行和多核并行版本模型,对比分析仿真速度和试验波形,结果表明:与单核串行仿真方式相比,采用多核并行方式大大提高了仿真速度,且试验波形高度吻合,验证了该分核并行方法的有效性和准确性。该方法不仅适用于特高压直流输电工程仿真,亦适用于其他大规模电力系统仿真,具有很好的推广价值。

## 参考文献

- [1] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状及发展[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 66-70.  
TANG Yong. Status and development of digital simulation technology of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 66-70.
- [2] 陶瑜, 马为民, 马玉龙, 等. 特高压直流输电系统的控制特性[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 1-5.  
TAO Yu, MA Weimin, MA Yulong, et al. Control characteristics of UHVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 1-5.
- [3] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.  
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [4] WANG Longchang, GAO Houlei, ZOU Guibin. Modeling methodology and fault simulation of distribution networks integrated with inverter-based DG[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 370-378. DOI: 10.1186/s41601-017-0058-9.
- [5] 陈凯, 段翔颖, 郭小江. 特高压交直流混联电网稳定控制分析[J]. 电力建设, 2016, 37(1): 64-69.  
CHEN Kai, DUAN Xiangying, GUO Xiaojiang. Stability control analysis of UHV AC/DC hybrid power grid[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(1): 64-69.
- [6] 白仕雄, 刘凯, 宋梁, 等.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电线路微气象实时监测与带电作业安全评估方法研究[J]. 高压电器, 2019, 55(6): 198-204.  
BAI Shixiong, LIU Kai, SONG Liang, et al. Study on the method of real time monitoring of microclimate and live working safety evaluation for  $\pm 800$  kV ultra high voltage DC transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6): 198-204.
- [7] 刘云, 蒋卫平, 印永华, 等. 特高压交直流大电网的数模混合实时仿真系统建模[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 52-56.  
LIU Yun, JIANG Weiping, YIN Yonghua, et al. Modeling of digital analog hybrid real-time simulation system for UHV AC/DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 52-56.
- [8] 周俊, 郭剑波, 胡涛, 等. 高压直流输电系统数字物理动态仿真[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 221-228.  
ZHOU Jun, GUO Jianbo, HU Tao, et al. Digital/Analog dynamic simulation for  $\pm 500$  kV HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 221-228.
- [9] 刘云, 印永华, 曾南超, 等. 数模混合式高压直流输电仿真系统的建立[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(18): 38-54.  
LIU Yun, YIN Yonghua, ZENG Nanchao, et al. Model establishment of digital/analog HVDC simulation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(18): 38-44.
- [10] 刘旭辉, 张爱玲, 曹森, 等. 基于 HCM3000 直流控制保护平台新型仿真系统实现与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 180-186.  
LIU Xuhui, ZHANG Ailing, CAO Sen, et al. Implementation and application of new generation simulation system based on HCM3000 DC control protection platform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 180-186.
- [11] 胡涛, 朱艺颖, 印永华, 等. 含多回物理直流仿真装置的大电网数模混合仿真建模及研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 68-75.  
HU Tao, ZHU Yiyang, YIN Yonghua, et al. Modeling and study of digital/analog hybrid simulation for bulk grid with multi-analog HVDC simulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 68-75.
- [12] 王伟. 特高压直流输电控制保护系统实时仿真技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 142-147.  
WANG Wei. Research and application of real-time simulation technology for UHVDC control and protection system[J]. Power System Protection and Control, 2019,

- 47(15): 142-147.
- [13] 郭剑波, 周俊, 郭强, 等. 华北-华中-华东交直流输电系统数模混合仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 55-59.  
GUO Jianbo, ZHOU Jun, GUO Qiang, et al. Digital and analog hybrid simulation of interconnected UHVAC/UHVDC transmission system from north China via central China to east China[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 55-59.
- [14] 王成山, 李鹏, 王立伟, 等. 电力系统电磁暂态仿真算法研究进展[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 97-103.  
WANG Chengshan, LI Peng, WANG Liwei, et al. Progresses on algorithm of electromagnetic transient simulation for electric power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 97-103.
- [15] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 溪洛渡-浙江 $\pm 800$  kV特高压直流输电工程直流保护系统实施策略及其仿真试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 115-121.  
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. DC protection system implementation strategy and simulation test study of  $\pm 800$  kV UHVDC power transmission project from Xiluodu to Zhejiang[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 115-121.
- [16] LI Guanqun, YE Hua, GAO Shilin, et al. Modeling and simulation of large power system with inclusion of bipolar MTDC grid[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 116: 105565-105575.
- [17] 苏进国, 李泰, 张爱玲, 等. 基于工程平台的直流控制保护系统全数字仿真建模与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 180-187.  
SU Jinguo, LI Tai, ZHANG Ailing, et al. Full-digital simulation modeling and application for control and protection system based on HVDC project platform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 180-187.
- [18] 雷霄, 许自强, 王华伟, 等.  $\pm 800$  kV特高压直流输电工程实际控制保护系统仿真建模方法与应用[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1359-1364.  
LEI Xiao, XU Ziqiang, WANG Huawei, et al. A modeling method for actual control and protection system of  $\pm 800$  kV UHVDC transmission project and its application[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1359-1364.
- [19] 万磊, 丁辉, 刘文焯. 基于实际工程的直流输电控制系统仿真模型[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 629-634.  
WAN Lei, DING Hui, LIU Wenzhuo. Simulation model of HVDC transmission control system based on practical engineering[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 629-634.
- [20] 徐政, 李宁臻, 肖晃庆, 等. 大规模交直流电力系统并行计算数字仿真综述[J]. 电力建设, 2016, 37(2): 32-37.  
XU Zheng, LI Ningcan, XIAO Huangqing, et al. A review of parallel computing digital simulation of large-scale AC/DC power system[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(2): 32-37.
- [21] 胡涛, 印永华, 蒋卫平, 等. 数模混合实时仿真系统及其在特高压交直流电网研究中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(17): 32-37.  
HU Tao, YIN Yonghua, JIANG Weiping, et al. Digital/analog hybrid real-time simulation system and its application in study on ultra-high voltage AC/DC power grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(17): 32-37.
- [22] 柏传军, 叶周, 程璐璐, 等. 基于实际工程及虚拟装置的直流输电控制保护模型设计方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 186-191.  
BAI Chuanjun, YE Zhou, CHENG Lulu, et al. Design method of control and protection model for DC transmission based on actual project and virtual device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 186-191.
- [23] 薛英林, 吴方劼, 张涛, 等. 基于PSCAD/EMTDC的多端柔性直流输电系统并行仿真计算[J]. 电力建设, 2016, 37(2): 10-17.  
XUE Yinglin, WU Fangjie, ZHANG Tao, et al. Parallel simulation of multi-terminal MMC-HVDC system based on PSCAD/EMTDC[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(2): 10-17.
- [24] 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: (二)直流输电工程数模混合仿真建模及验证[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 32-37.  
ZHU Yiyang, YU Zhao, LI Baiqing, et al. Construction and verification of electromagnetic transient digital analog hybrid simulation platform for large-scale AC/DC power grid: (2) modeling and verification of digital analog hybrid simulation for HVDC transmission project[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 32-37.
- [25] HOANG L H, SOUMAGNE J C. Digital real-time simulation of transmission lines using parallel processors[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1995, 38(4-6): 293-301.

收稿日期: 2020-11-25; 修回日期: 2021-03-04

作者简介:

胡永昌(1987—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要从事高压直流输电控制保护系统仿真研究工作; E-mail: hu120407@163.com

李泰(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高压直流输电控制保护系统仿真开发工作;

曹森(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事特高压直流控制与保护系统设备开发和工程管理工作。

(编辑 许威)