

基于 UREP 的有源中压配电网电磁暂态建模方法

李本鑫¹, 陈卓¹, 徐玉韬², 郝正航¹, 吴钦木¹, 李亚辉¹, 赵朗程¹

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵阳 550025)

摘要: 在能源转型的影响日益扩大的背景下, 高比例的可再生能源和电力电子设备的接入给新型电力系统的研究带来了难题, 传统电力系统开始朝着电网、电源、负荷与储能的综合动态平衡改变。因此, 新型电力系统的模型仿真需要进行更加精确、快速的动态模拟来验证。而大规模的新型电力系统电磁暂态仿真目前缺乏高效的仿真方案及有效的仿真工具, 基于国产实时仿真器 UREP、以中压配电网的 Simulink 模型为例提出了“全拓扑、全电磁暂态、全配置”概念, 运用理想变压器模型(ideal transformer model, ITM)将系统模型进行降阶处理, 采取多核并行计算技术进行分核处理, 仿真结果显示所提建模方法不仅提高了新型电力系统模型的仿真精确度, 还极大地缩短了模型仿真时间, 从而验证了大规模新型电力系统仿真的可行性。

关键词: 有源中压配电网; ITM 模型分割; UREP-300; 多核并行计算

Electromagnetic Transient Modeling Method for Active Medium Voltage Distribution Network Based on UREP

LI Benxin¹, CHEN Zhuo¹, XU Yutao², HAO Zhenghang¹, WU Qinmu¹, LI Yahui¹, ZHAO Langcheng¹

(1. School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550025, China)

Abstract: Against the backdrop of the increasingly expanding impact of energy transformation, the integration of high proportion of renewable energies and power electronic devices brings challenges to the research of the new power system. The traditional power system is beginning to shift towards a comprehensive dynamic balance of power grid, power source, load and energy storage. The model simulation of the new power system requires more accurate and rapid dynamic simulation to verify. However, there is currently a lack of efficient simulation solutions and effective simulation tools for large-scale electromagnetic transient simulation of the new power system. Based on the domestic real-time simulator (UREP) and taking the Simulink model of the medium voltage distribution network as an example, this paper proposes the concept of "full topology, full electromagnetic transient, and full configuration", and uses ideal transformer model(ITM) segmentation to reduce the order of the system model and multi-core parallel computing technology to kernel the model, the results show that the proposed modeling method not only improves the simulation accuracy of the new power system model, but also greatly shortens the simulation time of the model, which verifies the feasibility of large-scale new power system simulation.

Key words: active medium voltage distribution network; ITM model segmentation; UREP-300; multi-core parallel computing

0 引言

在新型电力系统概念的提出和“碳达峰、碳中和”国家能源战略的背景下, 电网中大量电力电子元件的运用、多种分布式电源的接入和大规模复杂

器件的加入让传统电力系统的电源与负荷之间的动态平衡受到破坏, 朝着电网、电源、负荷与储能的综合动态平衡改变, 严重影响了新型电力系统的安全性以及稳定性^[1-2]。随着新型电力系统组成要素变得越来越复杂, 其大规模仿真的紧迫性以及必要性开始显现出来。目前, 国内电力科研院所、教育培训机构等都密切关注新型电力系统电磁暂态仿真, 但由于缺乏有效的仿真工具及方案, 对其认识

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52267003)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China(52267003).

还不够深入、全面。新型电力系统具有强不确定性、弱抗扰性、低惯性以及强非线性,其动态响应特性及规模庞大特征给仿真技术带来更多的难题与挑战^[3-5]。

由于电磁暂态仿真基于各类模型的差异特性对电力系统中不同元件进行精确建模,其数学模型精细复杂、计算步长小、计算开销大,导致规模化仿真的速度慢、难以满足新型电力系统的要求^[6-7]。所以,要在保障万节点级大规模新型电力系统仿真效率的同时还要确保高比例电力电子化电网的计算精度。文献[8]依据电力系统动态模拟和实时数字仿真的相似性、有效性,提出了数模混合系统概念。文献[9]采用子网并行计算技术,基于超算的大电网数字并行仿真系统加快了仿真计算效率。文献[10]通过简化直流模型,利用矩阵计算概述了大电网电磁暂态仿真步骤。文献[11]研发了高性能电磁暂态仿真云平台 Cloud PSS,通过数据交换技术与并行仿真技术实现大规模电力电子网络电磁暂态仿真。文献[12]通过设计硬件模板建立系统模型结合 Python 脚本硬件生成器在 FPGA 系统上实现电磁暂态实时仿真的快速运行。文献[13]运用模型分割方法对高压直流输电系统进行分割,分别在多核系统上进行串行与并行计算研究,加速了模型仿真。

上述文献都在新型电力系统的动态模拟上进行了深入研究,通过各种软、硬件在环仿真,以对大电网系统在不同计算步长的混合速率仿真进行详细分析,简化复杂电力系统的电磁暂态建模,一定程度上减小了新型电力系统电磁暂态仿真难度,但仍然存在部分问题:1)仿真规模较小,不能够精细化动态模拟大规模新型电力系统。2)多种新能源接入电网会引发电网安全稳定性问题,没有相应的策略分析。3)在研究电力系统实时动态特性的时候需要对电网各个节点电压以及负荷潮流进行实时监测、馈线故障模拟等。这些行为的模拟并没有得到实现,本文进一步扩大了仿真规模,对各个新能源模型进行模型切割以及分核处理,然后再对每个节点电压以及负荷潮流波形实时观测,改善了上述问题。

本文基于国产实时仿真器 UREP(universal real-time experimental platform),在大规模的新型电力系统模型仿真中提出“全拓扑、全电磁暂态、全配置”的三全方案,运用模型分割方法和多核并行技

术对系统模型建模和仿真,以中压配电网其中的两个变电站的所有 10 kV 线路为例验证了全电磁暂态建模仿真的可行性。

1 新型电力系统实时仿真新要求

1.1 “全拓扑、全电磁暂态、全配置”概念

针对传统等值模型方法在万节点级大规模新型电力系统仿真中精确度差^[14]、适用性低^[15]等问题,本文提出“全拓扑、全电磁、全配置”概念,其中全拓扑方案是指对整个新型电力系统搭建仿真模型,由大电网详细拓扑和电源结构完整构建,不对模型进行网络化简或等值仿真。即在本文中搭建中压配电网所有 10 kV 线路元件、线路上的分布式电源(光伏、风机)、变压器和负荷全拓扑模型。全电磁暂态是指对电网中的所有元件(新能源机组、线路、变压器、负荷等)进行三相瞬时值变量建模,仿真步长采用典型 50 μs 。全电磁暂态方案与机电暂态仿真相比,虽然前者的仿真精度高,但计算量却是后者 1 000 倍左右,导致仿真效率低。全配置是指模型不但要包含所有一次系统,还需要搭建保护及自动化系统。比如在 10 kV 中压配电网中的阶段式电流保护、馈线首端的自动重合闸;在有源配电网中,风机、光伏等元件的故障穿越以及保护模型^[16]。

1.2 “三全”实时仿真的难点与解决方案

在县域级的电力系统中就存在上万个节点,中压配电网一个变电站的部分 10 kV 线路如图 1 所示。

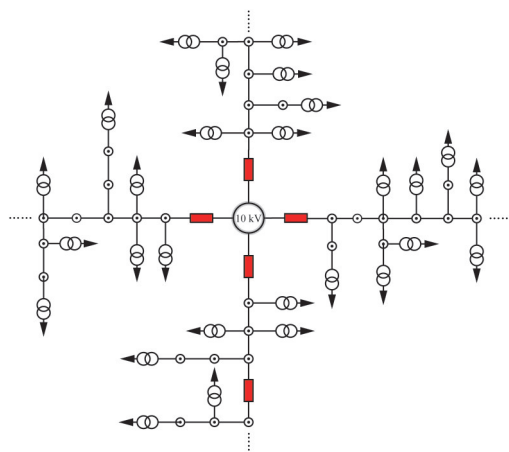


图 1 县域配电系统(10 kV)部分结构

Fig. 1 Partial structure of county-level distribution system (10 kV)

仿真模型规模十分巨大,同时新型电力系统中还有着大量的风电场、光伏电站等新能源元件、电力电子设备和控制系统,这些复杂模型导致仿真计算量明显增大,超出了一般仿真器的计算处理能力。而提高大电网仿真计算速度的主要方法就在于降低仿真计算量和加强计算数据处理能力。在降低仿真计算量方面可采用模型分割方法将一个大规模电力系统切割成多个子系统,即将一个状态空间方程分为多个状态空间群组,每个群组都在每个状态空间矩阵里进行计算;在仿真器方面 UREP-300 能够将模型分割的子系统分别放在不同的核里进行并行仿真处理。其步骤结构如图 2 所示。

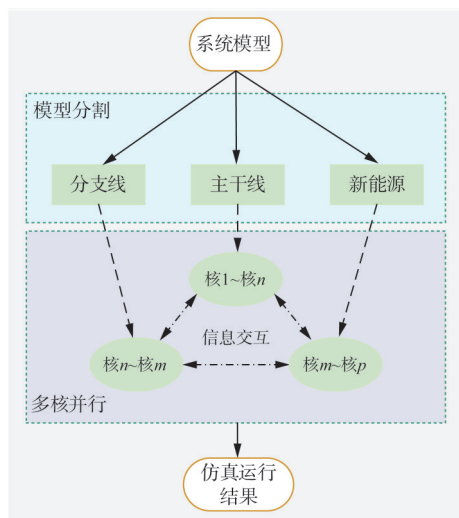


图2 实时仿真步骤结构图

Fig. 2 Structure diagram of real time simulation step

2 模型分割

在大规模新型电力系统电磁暂态建模中,模型分割方法的应用是为了将大电网模型切割成多个较小的子系统,对原系统解耦,降低原系统状态空间矩阵阶数,提高仿真的运行速度^[17]。可是当对模型切割次数过多时会导致系统模型稳定性变差,所以对于不同的电网系统模型,分割方法的选择尤为重要。模型分割方法根据接口算法的不同分为以下几种常用方法:长输电线路法、状态空间节点法、阻尼阻抗法和理想变压器模型法^[18](ideal transformer model, ITM)。不同的模型分割方法将系统切割后的稳定判据也不同。其中长输电线路法必须在输电线路长度大于 15 km 情况下才能对系统自然解耦,

否则会导致大电网系统模型失稳^[19];状态空间节点法需要实时计算分割后主系统和子系统的戴维南等值阻抗,进行两者之间的实时匹配,只适用于小规模、复杂程度不高的电网系统模型^[20]。在有源中压配电网系统模型中,模型输电线路长度一般在 12~15 km 范围内,并且模型规模庞大、与每个节点相连的分支线路错综复杂,所以以上两种方法并不适用。由于理想变压器模型法原理简单,容易在中压配电网系统模型中实现,并且模型仿真精度较高,所以本文采用理想变压器模型分割方法进行对电力系统的分割。

2.1 理想变压器模型分割法基本原理

理想变压器模型分割法基于替代原理分割模型,能够实现两个或多个系统之间的数据交互^[21]。根据接口类型的不同选择,ITM 模型分割方法分为电压型和电流型。本文以电流型 ITM 为例对一个系统电路进行分割,如图 3 所示。图中 $E_1(t)$ 、 $E_2(t)$ 分别为系统 1 和系统 2 的交流电源, Z_1 、 Z_2 分别为系统 1 和系统 2 的线路阻抗。

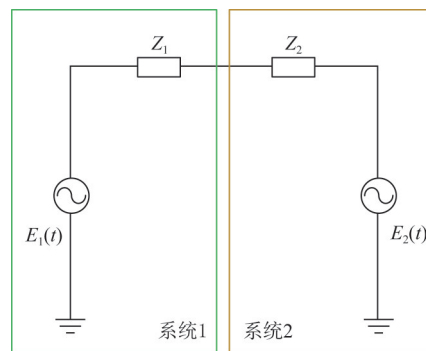


图3 系统电路拓扑图

Fig. 3 System circuit topology

分割后的模型通过受控源的信号交互实现对原电路的等效,如图 4 所示。

在电流型 ITM 接口算法中将电流信号 $i_1(t)$ 延时一个步长后发送到受控电流源,作为其输入信号使系统 2 运行。然后将系统 2 运行产生的电压信号 $u_2(t)$ 直接反馈发送到系统 1 的受控电压源,继续进行下一个循环过程。对于图 4 所示电路时域电流方程为:

$$\begin{cases} i_1(t) = \frac{E_1(t) - u_1(t)}{Z_1} \\ i_2(t) = \frac{u_2(t) - E_2(t)}{Z_2} \end{cases} \quad (1)$$

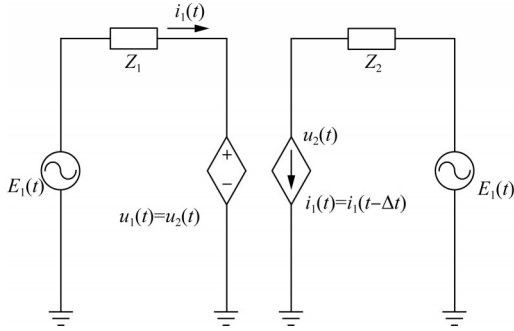


图 4 ITM 结构原理图

Fig. 4 ITM structural schematic diagram

式中: $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$ 分别为系统 1 和系统 2 的电流信号; $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ 分别为系统 1 和系统 2 的电压信号。由于在模型分割的串行计算中如果不在传输电流信号时加入延时步长系统模型会受到代数环影响而导致不能稳定运行, 而在并行计算时每个 CPU 核之间相互传输信号时会有固定延时, 延时会产生电流误差, 设 t 时刻产生的电流误差为 ε 。

$$\Delta i_2(t) = \varepsilon \quad (2)$$

随着电流误差导致的电压误差为:

$$\Delta u_2(t) = Z_2 \cdot \varepsilon \quad (3)$$

该电压误差又会在系统 1 里导致新的电流误差:

$$\Delta i_1(t + \Delta t) = -\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right) \varepsilon \quad (4)$$

从式(4)可知误差会以 (Z_2/Z_1) 倍数持续变大, 若 $(Z_2/Z_1) > 1$, 误差就会导致系统失稳。

2.2 风机与光伏的模型分割

传统的分布式电源并网模型的搭建都是基于风机与光伏电源原理与结构搭建等值模型^[22-24], 虽然降低了电力系统模型的复杂程度、加快了仿真效率, 但是同时也让系统仿真精确度变低, 当搭建上万节点新型电力系统模型时会使得精确度进一步降低, 无法满足系统仿真要求。

在搭建风机与光伏并网模型时首先采取“三全”方案构建模型的详细拓扑结构, 不进行网络化简和等值处理。其次在分布式电源并网时变压器一次侧接入电网, 在二次侧中的输电线路处进行 ITM 模型分割。使大量电力电子元件与电网系统解耦, 降低原系统状态空间方程阶数。

在系统模型中不使用模型分割算法, 将模型作为一个状态空间群组, 可得状态空间方程组:

$$x_{n+1} = A_m x_n + B_m y_{n+1}, m = 1, 2 \dots \quad (5)$$

式中: x 为状态变量; A_m 、 B_m 为状态矩阵; y 为输出量; m 、 n 为方程组维数。仿真过程中, 仿真器会对模型电力电子元件的每种开关管状态进行计算并存储所得的系统矩阵, 假设开关管数量为 a , 此时 m 值为 2^a 。

当使用 ITM 算法对模型切割时, 假设整个系统分为一个主系统和 b 个子系统, 每个子系统开关管数量 c 为:

$$c = \frac{a}{b} \quad (6)$$

此时 b 个子系统的状态空间方程组为:

$$\begin{cases} x_{n_1+1} = A_{m_1} x_{n_1} + B_{m_1} y_{n_1+1}, m_1 = 1, 2 \dots 2^c \\ x_{n_2+1} = A_{m_2} x_{n_2} + B_{m_2} y_{n_2+1}, m_2 = 1, 2 \dots 2^c \\ \vdots \\ x_{n_b+1} = A_{m_b} x_{n_b} + B_{m_b} y_{n_b+1}, m_b = 1, 2 \dots 2^c \end{cases} \quad (7)$$

式中 n_b 、 m_b 为第 b 个子系统的方程组维数。由式(7)可知 ITM 模型分割方法明显减少了系统状态空间矩阵计算量, 从原来 2^a 次变成了 $b \times 2^c$ 次, 减小单核仿真的运算难度, 加快了模型仿真速度。

2.3 ITM 在中压配电网中的应用

根据 ITM 接口算法的稳定判据可知, 运用 ITM 方法切割模型时, 只需要使子系统等效阻抗小于主系统的等效阻抗就能在提高仿真效率的同时保证系统的稳定性, 方法简单易实现。

针对 ITM 方法在有源中压配电网系统仿真里的有效性和快速性, 以两个变电站所馈出的全部 10 kV 线路模型为例对系统里的主干线、分支线和新能源模块进行切割, 然后进行离线仿真验证, 如图 5 所示。

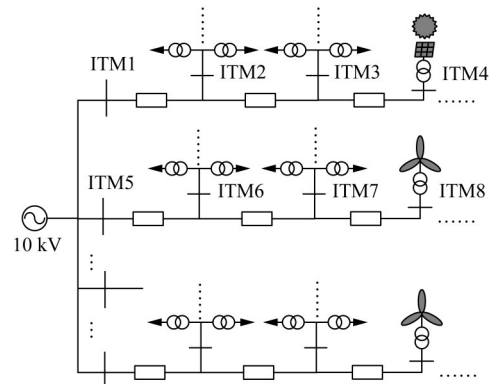


图 5 变电站馈线分割拓扑图

Fig. 5 Topology diagram of substation feeder division

图 5 中一个模型包含 10 台光伏和 10 台双馈风机, 线路上总共约有 2 000 个节点和 1 113 个开关管。

在对模型分割前, 系统状态空间方程组维数为 2^{1113} , 对模型进行分割成一个主系统 12 个子系统后, 系统状态空间矩阵计算量减少到 13×2^{86} , 有效减少了单核工作量, 加快了模型仿真效率。

3 实时仿真平台构建

3.1 多核并行仿真平台

虽然模型分割算法能减少单核 CPU 的计算量和内存使用程度, 但是在大规模电力系统模型中单核 CPU 预计算量仍然是一个比较大的数值, 为了能够扩大模型仿真规模, 需要对状态空间群组进行分核并行计算, 即将每个子系统模型分别放在不同的核里, 核与核之间数据交互并行仿真, 此时每个核预计算次数为 2^c , 进一步减少 CPU 计算量。

实时仿真器(UREP-300)是课题组自主研发的实时仿真平台, 包含多核处理主板机、硬件解算器、智能 I/O 接口单元、高速通信单元和智能功率变换模块等硬件^[25-29]。其基础框架如图 6 所示。

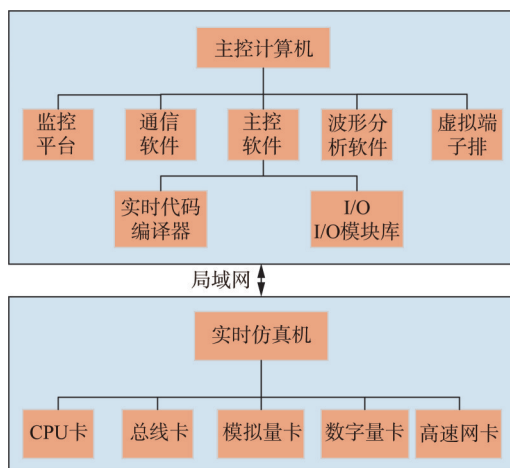


图 6 仿真平台构架图

Fig. 6 Simulation platform architecture diagram

模型通过编译成 C 代码上传到 UREP-300 仿真器中, 由仿真器的多核并行运行, 核与核之间的数据交互, 来实现模型的实时仿真。

3.2 仿真步骤

仿真步骤主要分 3 步: 第一步在主控计算机上搭建中压配电网变电站模型, 通过离线仿真验证模型节点电压以及各线路潮流值是否正常。第二步使

用 ITM 方法将模型分割成多个子系统, 再次离线仿真与模型分割前进行对比。第三步将主系统模型以及子系统模型分核处理, 将各模型编译成 C 代码上传到实时仿真器中进行仿真, 输出节点电压、电流以及功率波形在 LabVIEW 软件上观察规律, 验证模型的正确性。实时仿真器控制界面如图 7 所示。



图 7 实时仿真器控制界面

Fig. 7 Control interface of real time simulator

4 仿真分析

为了验证“三全”概念以及 ITM 模型分割方法对中压配电网系统仿真的精度和效率的影响, 搭建第 1 节中压配电网系统两个变电站所有 10 kV 线路的 Simulink 模型, 如图 8 所示。

实验一: 首先对模型进行离线仿真, 对馈线主干节点分割前后的电压、电流以及有功功率进行对比, 验证在“全拓扑、全电磁、全配置”概念下 ITM 模型分割的有效性。图 9—11 分别为主干线分割前后各项指标的波形对比图。

由图 9—11 可知, 中压配电网系统电压保持稳定且维持在额定电压 10 kV; 电流稳定在 42 A 左右; 有功功率保持在 0.43 MW 左右。对比电压、电流以及有功功率波形图可看出系统经过模型分割后仍可稳定运行, 且分割前后主干线节点各项指标仿真波形高度一致, 验证了 ITM 分割方法的有效性与准确性。

进一步研究观测系统分支线的分割前后波形

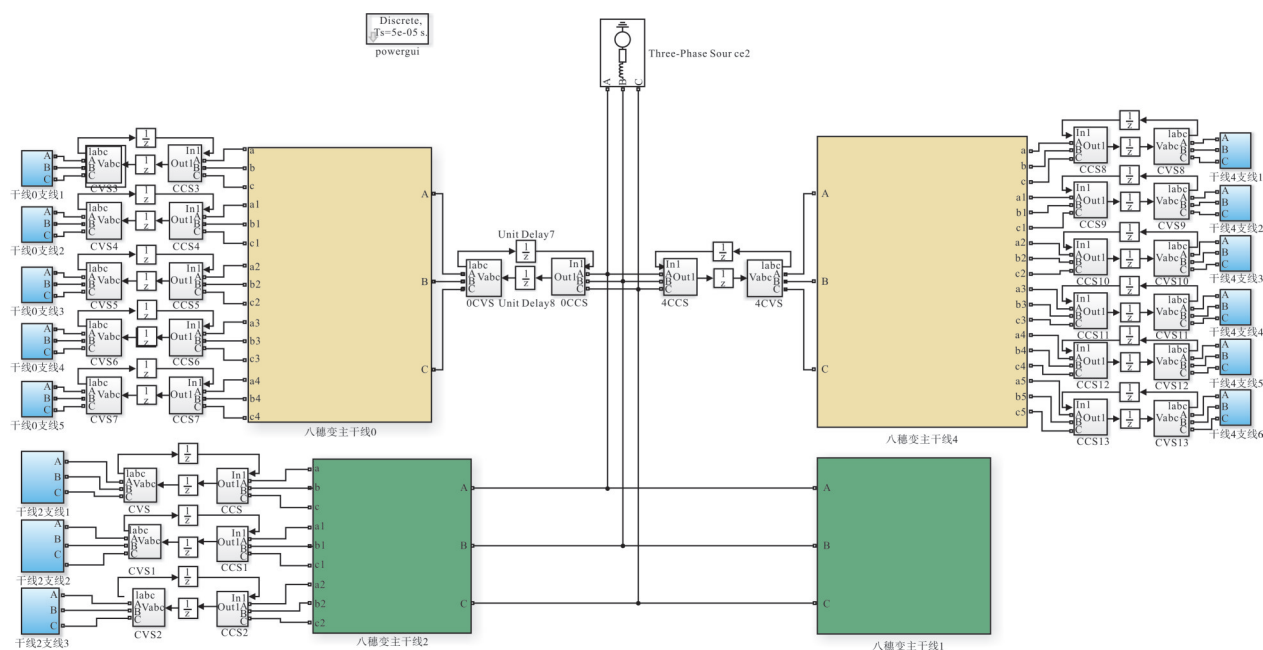


图 8 系统仿真模型图

Fig. 8 System simulation model diagram

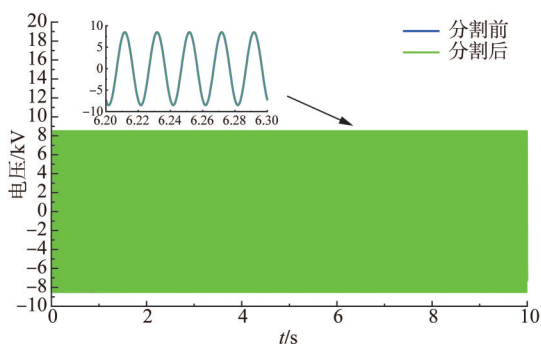


图 9 B相电压波形图

Fig. 9 Voltage waveform diagram of phase B

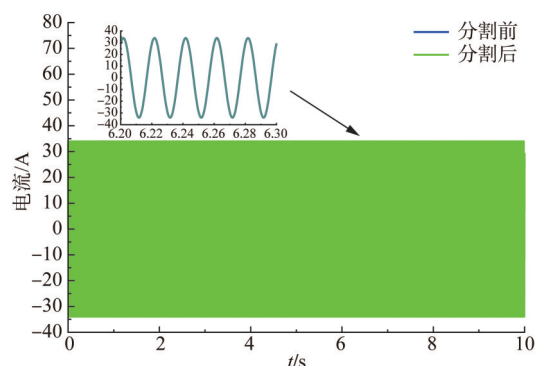


图 10 B相电流波形图

Fig. 10 Current waveform diagram of phase B

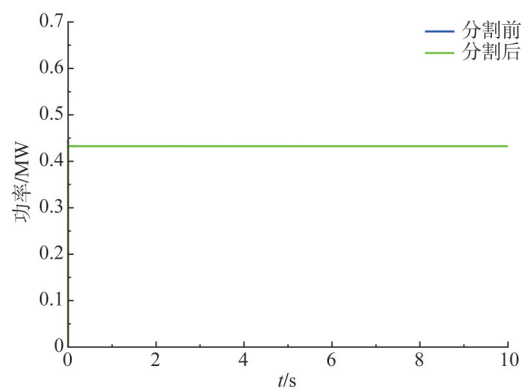


图 11 有功功率波形图

Fig. 11 Active power waveform diagram

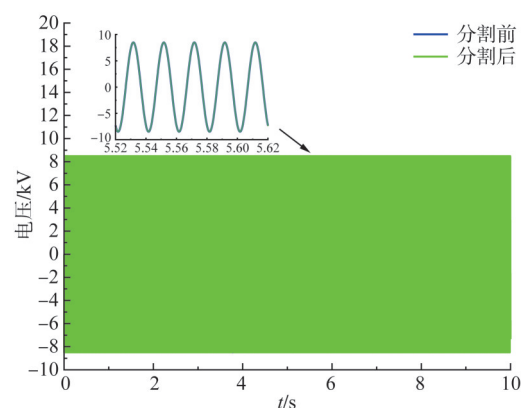


图 12 支线B相电压波形图

Fig. 12 Voltage waveform diagram of branch line B phase

图, 图 12—14 分别为分支线分割前后的电压、电流和有功功率对比图。

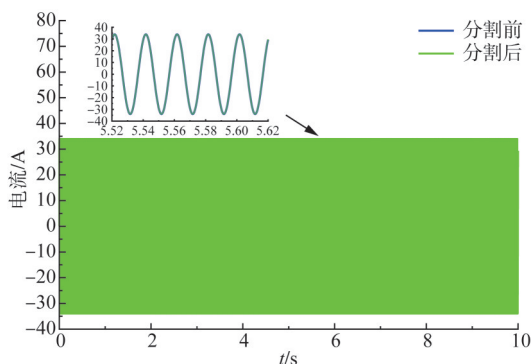


图 13 支线 B 相电流波形图

Fig. 13 Current waveform diagram of branch line B phase

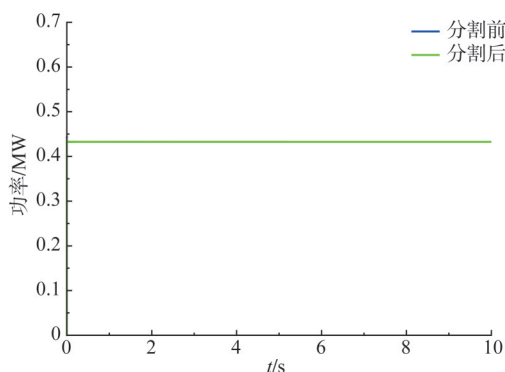


图 14 有功功率波形图

Fig. 14 Active power waveform diagram

由图 12—14 可知, 建立的中压配电网系统模型在使用 ITM 模型分割方法后, 主系统与子系统的节点电压、电流值一致, 同样验证了 ITM 模型分割方法的可行性。

实验二: 将所建立的有源中压配电网模型进行分核, 第一个变电站馈出的所有 10 kV 线路分为 13 个模型, 第二个分为 8 个模型, 总共分成 21 个模型, 然后对每个模型进行程序编译, 上传到多核并行仿真平台 UREP-300 上实时仿真, 最后在 LabView 软件上输出波形, 波形仍然选择同一主干线的电压、电流及功率数据, 如图 15—17 所示, 图中横坐标为仿真实时时间, 纵坐标为幅值。

由图 9—11、15—17 可知模型离线仿真波形与实时仿真波形稳态值一致, 有效说明实时仿真方法成功。进一步研究比较仿真条件不同情况下仿真误差与速度。误差取相对误差 δ , 其公式为:

$$\delta = \frac{|U_n - U_m|}{U_n} \cdot 100\% \quad (8)$$

式中: U_n 为模型未分割前(等值)节点电压; U_m 为

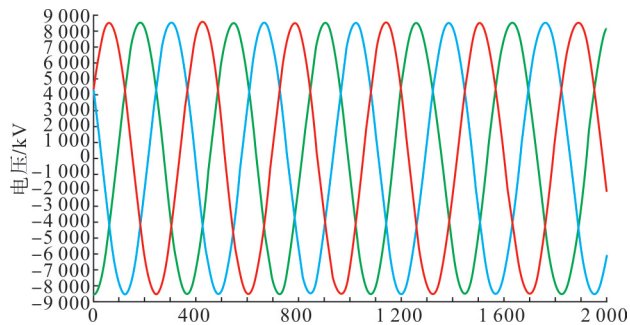


图 15 实时仿真电压波形图

Fig. 15 Real time simulation voltage waveform diagram

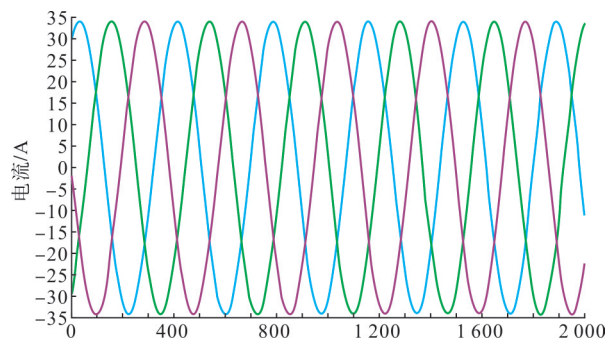


图 16 实时仿真电流波形图

Fig. 16 Real time simulation current waveform diagram

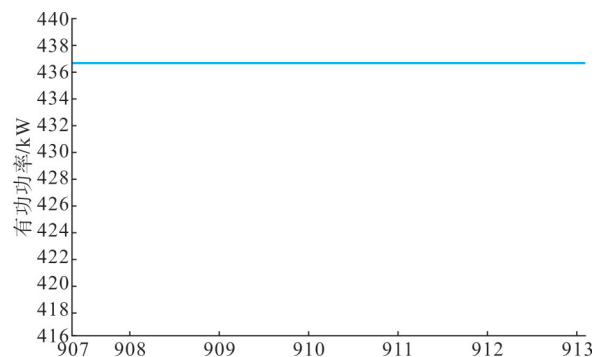


图 17 实时仿真有功功率波形图

Fig. 17 Real time simulation of active power waveform diagram

模型分割后(等值)节点电压。系统模型在不同的仿真条件下, 对仿真用时和模型误差进行比较。如表 1 所示, 其中等值模型是指将多台风机与光伏等值为一台风机和一台光伏模型。

由表 1 可直观看出本文方法不仅提高了传统的新型电力系统模型的精确度, 还极大地缩短了模型仿真时间, 当模型离线仿真时, 2.7 h 的运行才能完整结束 10 s 的模型仿真, 而实时仿真只需要 10 s 就能得到仿真结果, 说明本文提出的方法能够有效加速了大规模新型电力系统暂态模型仿真, 加速效果直观且明显。

表 1 仿真结果对比

Tab. 1 Comparison of simulation results

仿真条件	CPU 核 数量/个	仿真时 间/s	仿真用 时/s	最大误 差/%
全拓扑、未模型分割	1	10	9 720	0
全拓扑、模型分割	1	10	4 320	1.067 7
全拓扑、模型分割 UREP 实时仿真	21	10	10	1.237 4
等值模型 未模型分割	1	10	7920	2.078 5

5 结语

在对大规模新型电力系统进行电磁暂态仿真时传统建模方法在仿真规模上具有局限性,并且不能精确、高效及快速地凸显系统特点。本文提出“全拓扑、全电磁暂态、全配置”的概念,合理运用 ITM 模型分割方法对复杂、规模庞大的新型电力系统进行模型分割,有效降低了模型状态空间矩阵阶数,并在国产实时仿真器 UREP-300 上将模型分核处理,采用多核并行计算技术让模型高效、快速及稳定地仿真。通过本文实验结果对比,能够有效说明模型分割方法及多核并行技术的结合使用,解决了万节点县级新型电力系统的电磁暂态仿真精度低、速度慢等问题。

参考文献

- [1] 金丽娜. 新型电力系统稳定性问题探讨[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(32): 146 - 149.
JIN Lina. Discussion on stability of new power systems [J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(32): 146 - 149.
- [2] 熊家祚, 张能, 翟党国, 等. 大规模电力电子设备接入的电力系统混合仿真接口技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 152 - 161.
XIONG Jiazuo, ZHANG Neng, ZHAI Dangguo, et al. Overview of hybrid simulation interface technology for large-scale power electronic equipment integration in power systems [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 152 - 161.
- [3] 郭琦, 卢远宏. 新型电力系统的建模仿真关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 18 - 32.
GUO Qi, LU Yuanhong. Key technologies and prospects for modeling and simulation of new power systems [J]. Automation of Power Systems, 2022, 46(10): 18 - 32.
- [4] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2 - 11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for high proportion renewable energy power systems [J]. Automation of Power Systems, 2017, 41(9): 2 - 11.
- [5] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461 - 475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New problems and classification of "double high" power system stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461 - 475.
- [6] 熊卿, 张路寅, 张庆华, 等. 适应新型电力系统的高性能电磁暂态仿真技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 43 - 52.
XIONG Qing, ZHANG Luyin, ZHANG Qinghua, et al. High performance electromagnetic transient simulation technology and its application for new power systems [J]. Automation of Power Systems, 2022, 46(10): 43 - 52.
- [7] 杨明, 张永明, 张子骞, 等. 电力系统电磁暂态仿真算法研究综述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(8): 10 - 19.
YANG Ming, ZHANG Yongming, ZHANG Ziqian, et al. Overview of research on electromagnetic transient simulation algorithms in power systems [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2022, 59(8): 10 - 19.
- [8] 刘长胜, 陈礼义, 郑玉森, 等. 电力系统模数混合试验系统[J]. 天津大学学报, 2004(1): 80 - 83.
LIU Changsheng, CHEN Liyi, ZHENG Yusen, et al. Power system analog digital hybrid test system [J]. Journal of Tianjin University, 2004(1): 80 - 83.
- [9] 张星, 徐得超, 李亚楼, 等. 基于超算的大电网数字并行仿真系统构建及应用[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1144 - 1150.
ZHANG Xing, XU Dechao, LI Yalou, et al. Construction and application of digital parallel simulation system for large power grid based on supercomputing [J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1144 - 1150.
- [10] 程改红, 陆韶琦, 邵冲, 等. 大规模交直流电力系统电磁暂态仿真高效建模方法[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1919 - 1926.
CHENG Gaihong, LU Shaoqi, SHAO Chong, et al. Efficient modeling method for electromagnetic transient simulation of large-scale AC/DC power systems [J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1919 - 1926.
- [11] 陈颖, 高仕林, 宋炎侃, 等. 面向新型电力系统的高性能电磁暂态云仿真技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2854 - 2864.
CHEN Ying, GAO Shilin, SONG Yankan, et al. High performance electromagnetic transient cloud simulation technology for new power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2854 - 2864.
- [12] 谢立前. 大规模电磁暂态实时仿真系统的快速设计与实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [13] 刘飞, 黄绍书, 郝正航, 等. 一种直流输电系统实时仿真的模型分割方法[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(6): 139 - 143.
LIU Fei, HUANG Shaoshu, HAO Zhenghang, et al. A model segmentation method for real-time simulation of DC transmission system [J]. Experimental Technology and Management, 2018, 35(6): 139 - 143.
- [14] 乐程毅, 贝斌斌. 新能源接入对电网稳定性影响及应对[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2022, 44(6): 121 - 126.
LE Chengyi, BEI Binbin. Impact of new energy access on power grid stability and countermeasures [J]. Journal of Xiangtan University (Natural Sciences Edition), 2022, 44(6): 121 - 126.
- [15] 王璨, 侯强, 单莹, 等. 基于新能源接入的配电网可靠性评估

- [J]. 自动化与仪表, 2021, 36(11): 6-10.
- WANG Can, HOU Qiang, SHAN Ying, et al. Reliability evaluation of distribution network based on new energy access [J]. Automation and Instrumentation, 2021, 36(11): 6-10.
- [16] 曹帆. 风光储联合并网系统故障穿越控制模式研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [17] 谈竹奎, 班国邦, 徐玉韬, 等. 多端直流配电网实时仿真的模型分割方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 82-88, 95.
- TAN Zhukui, BAN Guobang, XU Yutao, et al. Model segmentation method for real-time simulation of multi terminal DC distribution network [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 82-88, 95.
- [18] 刘飞. 电力系统仿真模型分割及接口算法研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- [19] 徐得超, 张星, 何飞, 等. 电力系统机电-电磁混合仿真边界解耦算法研究[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1130-1137.
- XU Dechao, ZHANG Xing, HE Fei, et al. Research on boundary decoupling algorithm for electromechanical electromagnetic hybrid simulation of power system [J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1130-1137.
- [20] 雷廷浩. 复杂配电网模型分割及其应用研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [21] 郝正航, 刘飞, 陈卓. 一种电力系统交流电网实时仿真装置及其仿真方法: CN201711493507.5 [P]. 2018-05-22.
- [22] 黄伟, 张小珍. 基于特征分析的大规模风电场等值建模[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2271-2277.
- HUANG Wei, ZHANG Xiaozhen. Equivalent modeling of large-scale wind farms based on feature analysis [J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2271-2277.
- [23] 高崇, 陈沛东, 曹华珍, 等. 中压配电网分布式智能后备保护方案[J]. 南方电网技术, 2023, 17(8): 77-84.
- GAO Chong, CHEN Peidong, CAO Huazhen, et al. Distributed intelligent backup protection scheme for medium voltage distribution network [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(8): 77-84.
- [24] 张武洋, 杨飞, 孔繁哲, 等. 永磁直驱风电场故障等值建模方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(8): 23-30, 47.
- ZHANG Wuyang, YANG Fei, KONG Fanzhe, et al. Fault equivalent modeling method for permanent magnet direct drive wind farm [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(8): 23-30, 47.
- [25] 姜贵方, 郝正航, 李庆生, 等. 适用于大规模风电场全拓扑实时仿真的加速方法[J]. 南方电网技术, 2022, 16(10): 20-27, 67.
- LOU Guifang, HAO Zhenghang, LI Qingsheng, et al. Acceleration method for full topology real-time simulation of large-scale wind farms [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(10): 20-27, 67.
- [26] 李留生, 杨旭, 郝正航, 等. 基于实时仿真器的电机控制平台的开发[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2017, 34(6): 64-68.
- LI Liusheng, YANG Xu, HAO Zhenghang, et al. Development of motor control platform based on real-time simulator [J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences Edition), 2017, 34(6): 64-68.
- [27] 曹斌, 苏珂, 原帅, 等. 基于微分代数神经网络的含新能源区域电网端口动态特性学习方法[J]. 中国电力, 2023, 56(2): 23-31.
- CAO Bin, SU Ke, YUAN Shuai, et al. Portal dynamics learning method for renewable-integrated regional power networks based on neural differential-algebraic equations [J]. Electric Power, 2023, 56(2): 23-31.
- [28] 陈晓乾, 秦文萍, 杨乐, 等. 逆变式电源接入下的配电网自适应距离保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 27-38.
- CHEN Xiaojian, QIN Wenping, YANG Le, et al. Adaptive distance protection scheme for a distribution network given access of inverter power supply [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 27-38.
- [29] 罗旭恒, 蔡志文, 曾光辉, 等. 基于共模功率的交直流混合配电网单极接地故障识别方法[J]. 广东电力, 2023, 36(2): 66-75.
- LUO Xuheng, CAI Zhiwen, ZENG Guanghui, et al. Single-pole grounding fault identification method based on common mode power in AC/DC hybrid distribution system [J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(2): 66-75.

收稿日期: 2023-04-24; 网络首发日期: 2024-02-20

作者简介:

李本鑫(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源仿真技术及实验, 1079935239@qq.com;

陈卓(1980), 女, 通信作者, 教授, 博士, 研究方向为电力系统稳定与控制, chzh1230@163.com;

徐玉韬(1982), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为交直流互联配电网及微电网, 95616048@qq.com。