

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230430

适用于多能源长输电线系统实时仿真的建模方法

燕 豪, 陈 卓, 郝正航, 梁耀贤, 李亚辉, 吴钦木

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 随着多能源不断接入电网, 对多能源长输电系统的仿真研究得到了越来越多的关注。为了进一步提高多能源长输电系统的仿真效率和实现系统的大规模仿真, 提出一种基于长输电线路模型法的仿真接口算法。同时, 针对电磁暂态迭代计算中出现的延时问题, 提出一种对分割接口进行延时补偿的方法, 使得系统在仿真时具有更高的仿真精度。其中, 在模型接口算法中采用受控源作为分割接口的控制对象, 以实际多能源多电压等级长输电线路系统为算例, 分别在 Matlab/Simulink、实时仿真机(UREP_300)和 RT-LAB 仿真平台中进行验证。结果表明: 设计的长输电线路模型(transmission line model, TLM)接口算法与分布式接线用于长输电系统传输时的暂态和稳态结果基本一致, 该接口算法适用于离线仿真与实时仿真平台, 在提高仿真效率方面具有一定的优势。

关键词: TLM; 多能源长输电线路系统; 延时补偿; UREP_300; RT-LAB; 实时仿真

Modeling method for real-time simulation of multi-energy long-distance transmission line systems

YAN Hao, CHEN Zhuo, HAO Zhenghang, LIANG Yaoxian, LI Yahui, WU Qinmu

(School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: With the continuous connection of multi-energy to the power grid, simulation research on the multi-energy long-term transmission system has attracted increasing attention. To further improve simulation efficiency and realize large-scale simulation of a multi-energy long-distance transmission line system, a simulation interface algorithm is proposed based on a long-distance transmission line model method. Also, given the delay problem in the iterative calculation of electromagnetic transients, a method for delaying compensation of the segmentation interface is proposed. This gives the system higher simulation accuracy during simulation. The controlled source is used as the control object of the split interface in the model interface algorithm, and the actual multi-energy and multi-voltage long-distance transmission line system is used as an example to be verified in a Matlab/Simulink, real-time simulator (UREP_300) and RT-LAB simulation platform. The results show that the designed long-distance transmission line model (TLM) interface algorithm is basically consistent with the transient and steady-state results of distributed wiring for long-distance system transmission, and the interface algorithm is suitable for offline simulation and real-time simulation platform. This offers advantages in improving simulation efficiency.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52267003).

Key words: TLM; multi-energy long-distance transmission line system; delay compensation; UREP_300; RT-LAB; real-time simulation

0 引言

在“双碳”目标下, 各种形式的新能源接入大电网, 使得电网成为一个多能源输电系统, 然而由于多能源的接入, 我国电网结构的稳定性受到威胁^[1-3]。为了模拟多能源输电系统能够稳定的运行, 开展对

多能源长输电系统实时仿真的研究已经迫在眉睫^[4]。长输电线输电具有容量大、远距离、低损耗、省占地的突出优势, 广泛应用于电力的传输中, 成为我国远距离输电的主要方式^[5-6]。对于多能源长输电线路系统, 鉴于安全性、经济性等因素, 不可能直接进行电力试验, 于是电力仿真成为研究问题的首选。目前, 大规模高压输电系统仿真存在分布式接线长、结构复杂、节点数量多和开关数量多等特点,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52267003)

导致存储数据大、计算量大、仿真时间长, 严重影响了仿真效率, 甚至当仿真模型大到超出硬件承受范围时会导致仿真失败^[7-8]。

随着电力电子技术、通信技术和计算机技术的快速发展, 使得对各种拓扑结构的电力仿真成为可能。文献[9]提出对半波长输电线路多结构的并网仿真研究, 并设计出典型的半波长输电线路并网结构。文献[10]从电力系统实时仿真技术的发展角度描述了物理仿真、数模混合仿真和数字仿真 3 个阶段, 并比较了 3 种仿真技术的优缺点以及在实际应用中如何选择性的配合使用。文献[11]针对大电网仿真误差区域定位难的问题, 提出了一种基于扰动深度和最小树的致差域识别方法, 该研究方法能提高动态仿真的性价比。文献[12]利用两个不同的仿真软件分别对 DC 和 AC 输电系统进行非实时仿真, 并通过通信技术对两个仿真软件进行联接, 该方法初步展示了电磁暂态仿真的优点。文献[13]提出了一种基于电流源思想的混合直流输电系统机电暂态建模方法, 该方法能够较好地解决仿真精度和计算速度的矛盾, 为提升大规模交直流混联电网的仿真能力提供了有效的解决方法。文献[14]提出一种基于扩展状态空间分割法, 此方法适用于含风电场的电力系统运行备用风险评估。文献[15]提出的交直流分割并行算法, 将交流网络与直流网络分开计算, 通过数据交互实现关系式的统一求解, 该方法能提高仿真效率。文献[16]利用单机多核结构实现对称多核并行计算, 对大规模并行计算性能进行优化。文献[17-18]通过研究合理的网络拓扑模型划分法, 将需要进行拓扑分析的对象进行合理拆分, 并实现网络拓扑结构的计算, 提出了将电网进行分块处理的方法。文献[19]对特高压交流输电线路仿真模型进行研究, 并创建仿真输电线路的等值模型。文献[20]基于 PSCAD 对特高压交流输电系统进行仿真, 并准确地定位出特高压系统发生故障的位置。文献[21]提出一种海上风电直流汇集 DC/DC 系统实时仿真方法, 得到的结果与 PSCAD/EMTDC 离线仿真结果进行对比, 验证了所提方法的准确性。文献[22]提出一种基于主回路现有元件的等效短线路解耦方法, 能够解决在无线路或者短线路情况下分网并行的接口问题。虽然以上方法在一定程度上能实现高电压交流输电仿真, 且接口算法也适用于一定规模的电力系统, 但目前电网在“双高”比例的接入情况下, 这些方法较难应用于当前较大规模的多能源多电压等级的长输电系统离线与实时仿真。

本文从多能源多电压等级的长输电系统难以实现全拓扑仿真的问题出发, 根据电气工程设备参

数推导出线路的等值模型, 设计一种适用于多能源长输电系统的仿真接口算法。该方法以受控源作为控制对象, 对长输电线路使用改进的输电线路(transmission line model, TLM)接口算法进行分割, 进一步在多核(CPU)实时仿真平台(UREP_300)和 RT-LAB 中仿真, 最后以某实际的多能源多电压等级长输电系统为算例, 仿真对比分布式接线与所设计的 TLM 接口算法用于多能源长输电系统输电的结果表明, 所设计接口模型的正确性, 且在精度保证的前提下得出该方法能明显提升仿真效率。

1 多能源输电线的建模及仿真问题分析

多能源长输电系统主要由各种不同种类的元件组成, 其中分布式接线的动态特性对于暂态计算有直接影响^[23]。故建立长输电线的数学模型, 是研究多能源长输电系统仿真的重要方法, 本节主要介绍长输电线的建模方法以及多能源长输电线路在传统仿真中的问题分析。

1.1 多能源长输电线的建模方法

1.1.1 单根无损分布参数的等值计算

对于单根无损传输线可以等效为如图 1 所示的线路, 设单位长度的电感 L_0 和 C_0 均为常数, 则可以得到偏微分方程(1)。

$$\begin{cases} -\frac{\partial u(s,t)}{\partial s} = L_0 \frac{\partial i(s,t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial i(s,t)}{\partial s} = C_0 \frac{\partial u(s,t)}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\frac{\partial u(s,t)}{\partial s}$ 、 $\frac{\partial i(s,t)}{\partial s}$ 分别为电压和电流在 s 处的偏微分; $\frac{\partial u(s,t)}{\partial t}$ 、 $\frac{\partial i(s,t)}{\partial t}$ 分别为电压和电流在 t 时刻的偏微分。

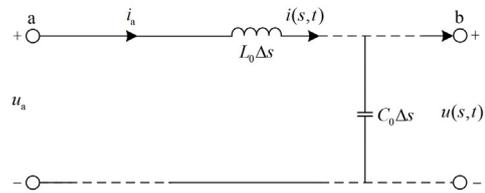


图 1 单根无损线路

Fig. 1 A single lossless line

式(1)可改写成二阶波动方程, 即

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u(s,t)}{\partial s^2} = \frac{1}{v^2} \times \frac{\partial^2 u(s,t)}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 i(s,t)}{\partial s^2} = \frac{1}{v^2} \times \frac{\partial^2 i(s,t)}{\partial t^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, v 为电磁波沿线的传播速度, $v = 1/\sqrt{L_0 C_0}$ 。

对式(2)求通解得到

$$\begin{cases} u(s,t) = y_1(s-vt) + y_2(s+vt) \\ i(s,t) = \frac{1}{Z_C} y_1(s-vt) - \frac{1}{Z_C} y_2(s+vt) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $y_1(s-vt)$ 、 $y_2(s+vt)$ 分别为 v 的前行波和反行波; Z_C 为线路的波阻抗, $Z_C = \sqrt{L_0/C_0}$ 。

将式(3)变换得到

$$u(s,t) + Z_C i(s,t) = 2y_1(s-vt) \quad (4)$$

$$u(s,t) - Z_C i(s,t) = 2y_2(s+vt) \quad (5)$$

在式(4)中, 分别令 $s=0$ 和 $s=l$, 则由图 1 可知, $u(0,t) = u_a(t)$ 、 $i(0,t) = i_{ab}(t)$ 、 $u(l,t) = u_b(t)$ 和 $i(l,t) = -i_{ba}(t)$ 。于是得到

$$u_a(t) + Z_C i_{ab}(t) = 2y_1(-vt) \quad (6)$$

$$u_b(t) - Z_C i_{ba}(t) = 2y_2(l-vt) \quad (7)$$

在式(6)中, 将 t 换成 $t-\tau$ (τ 为电磁波从 a 端传到 b 端所需的时间, 表达式为 $\tau = l/v$), 于是式(6)变为

$$u_a(t-\tau) + Z_C i_{ab}(t-\tau) = 2y_1(l-vt) \quad (8)$$

将式(7)和式(8)两式相减, 得到

$$u_b(t) - Z_C i_{ba}(t) = u_a(t-\tau) + Z_C i_{ab}(t-\tau) \quad (9)$$

式(9)可变换为

$$i_{ba}(t) = \frac{1}{Z_C} u_b(t) + I_b(t-\tau) \quad (10)$$

$$I_b(t-\tau) = -\frac{1}{Z_C} u_a(t-\tau) - i_{ab}(t-\tau) \quad (11)$$

采用相同的方法, 由式(5)可以导出

$$i_{ab}(t) = \frac{1}{Z_C} u_a(t) + I_a(t-\tau) \quad (12)$$

$$I_a(t-\tau) = -\frac{1}{Z_C} u_b(t-\tau) - i_{ba}(t-\tau) \quad (13)$$

式(10)一式(13)给出了 t 时刻线路一端电流、电压与 $t-\tau$ 时刻线路另一端电流、电压之间的关系。可由式(10)一式(13)这组关系得到等值电路, 如图 2 所示。由图 2 可知, 线路两端的电磁联系是通过 $t-\tau$ 时刻两端电压、电流的等值电流源来实现, 而无直接的拓扑联系。

1.1.2 单根有损分布参数的等值计算

1.1.1 节是对单根无损传输线的分析, 而分析有损长输电线时宜采用近似的方法处理。在 EMPT 中, 将整段线路分成几段, 并将总电阻等分后集中在该段线路的两端, 图 3 表示有损线路的等值方法。

图 3(c)中 $I_a(t-\tau)$ 和 $I_b(t-\tau)$ 与无损推导过程类

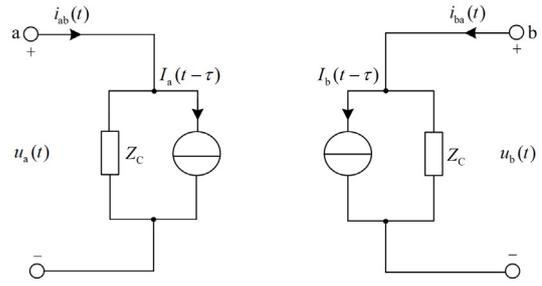
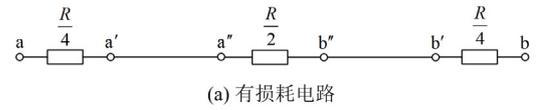
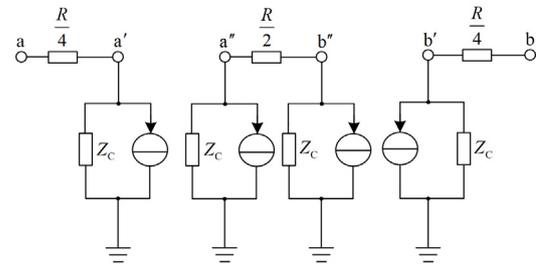


图 2 单根无损等值线路

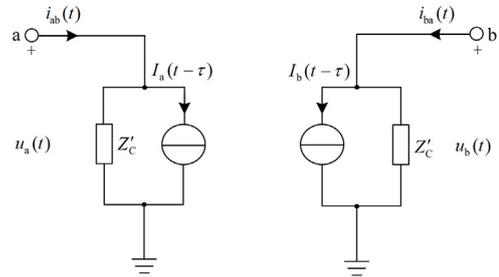
Fig. 2 A single lossless equivalent line



(a) 有损耗电路



(b) 等值计算电路



(c) 简化等值计算电路

图 3 计及线路电阻的等值方法

Fig. 3 Equivalent method considering line resistance

似, 其中

$$Z'_C = Z_C + R/4 \quad (14)$$

$$\begin{cases} I_a(t-\tau) = -\frac{1-h}{2} \times \left[\frac{U_a(t-\tau)}{Z'_C} + hi_{ab}(t-\tau) \right] - \frac{1+h}{2} \times \left[\frac{U_b(t-\tau)}{Z'_C} + hi_{ba}(t-\tau) \right] \\ I_b(t-\tau) = -\frac{1-h}{2} \times \left[\frac{U_b(t-\tau)}{Z'_C} + hi_{ba}(t-\tau) \right] - \frac{1+h}{2} \times \left[\frac{U_a(t-\tau)}{Z'_C} + hi_{ab}(t-\tau) \right] \end{cases} \quad (15)$$

其中,

$$h = (Z_c - \frac{R}{4}) / (Z_c + \frac{R}{4}) \quad (16)$$

1.1.3 多导线等值计算

与单根长输电线不同, 多根长输电线之间存在耦合关系, 但多导线分析方法与单根导线分析方法类似, 不同点在于多导线处理方法需要引入矩阵等效。现假设有 n 条长输电线, 电阻等效为集中参数, 对于多导线可以得到波动方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial s^2} = \mathbf{LC} \times \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 \mathbf{i}}{\partial s^2} = \mathbf{CL} \times \frac{\partial^2 \mathbf{i}}{\partial t^2} \end{cases} \quad (17)$$

式中, \mathbf{L} 和 \mathbf{C} 为相互耦合的满阵, 解析解较难求。

将式(17)相量 \mathbf{u} 和 \mathbf{i} 变换为另外两组向量 \mathbf{u}_m 和 \mathbf{i}_m , 可分别表示为

$$\begin{cases} \mathbf{u} = \mathbf{P}\mathbf{u}_m \\ \mathbf{i} = \mathbf{Q}\mathbf{i}_m \end{cases} \quad (18)$$

进一步得到

$$\begin{cases} \mathbf{u}_m = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{u} \\ \mathbf{i}_m = \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{i} \end{cases} \quad (19)$$

式中, \mathbf{P} 和 \mathbf{Q} 为 n 阶非奇异矩阵变换阵。

将式(18)代入式(17)得到

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \mathbf{u}_m}{\partial s^2} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{LCP} \times \frac{\partial^2 \mathbf{u}_m}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 \mathbf{i}_m}{\partial s^2} = \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{CLQ} \times \frac{\partial^2 \mathbf{i}_m}{\partial t^2} \end{cases} \quad (20)$$

由式(20)得到对角阵为

$$\begin{cases} \mathbf{P}^{-1}\mathbf{LCP} = \mathbf{A}_u \\ \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{CLQ} = \mathbf{A}_i \end{cases} \quad (21)$$

式(20)和式(21)表明多导线经过相-模转换后, 各个模量之间是相互独立的, 实现了线路的解耦。根据求解式(11)与式(13)的方法, 可得

$$\begin{cases} \mathbf{i}_{m,ab}(t) = \frac{1}{\mathbf{Z}_m} \mathbf{u}_{m,a}(t) + \mathbf{I}_{m,a} \\ \mathbf{i}_{m,ba}(t) = \frac{1}{\mathbf{Z}_m} \mathbf{u}_{m,b}(t) + \mathbf{I}_{m,b} \end{cases} \quad (22)$$

式中: \mathbf{Z}_m 为 $Z_{mi} (i=1,2,\dots,n)$ 构成的对角阵; $\mathbf{u}_{m,a}(t)$ 、 $\mathbf{i}_{m,ab}(t)$ 和 $\mathbf{I}_{m,a}$ 分别如式(23)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{m,a}(t) = [u_{m1,a}(t), \dots, u_{mn,a}(t)]^T \\ \mathbf{i}_{m,ab}(t) = [i_{m1,a}(t), \dots, i_{mn,a}(t)]^T \\ \mathbf{I}_{m,a} = [I_{m1,a}(t - \tau_{m1}), \dots, I_{mn,a}(t - \tau_{mn})]^T \end{cases} \quad (23)$$

式中, 模量 $\mathbf{u}_{m,b}(t)$ 、 $\mathbf{i}_{m,ba}(t)$ 和 $\mathbf{I}_{m,b}$ 与式(23)类似。

将式(19)代入式(22)可得到

$$\begin{cases} \mathbf{i}_{ab}(t) = \mathbf{QZ}_m^{-1}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{u}_a(t) + \mathbf{QI}_{m,a} \\ \mathbf{i}_{ba}(t) = \mathbf{QZ}_m^{-1}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{u}_b(t) + \mathbf{QI}_{m,b} \end{cases} \quad (24)$$

进一步等效得到

$$\begin{cases} \mathbf{i}_{ab}(t) = \mathbf{G}_q \mathbf{u}_a(t) + \mathbf{I}_a \\ \mathbf{i}_{ba}(t) = \mathbf{G}_q \mathbf{u}_b(t) + \mathbf{I}_b \end{cases} \quad (25)$$

式中: \mathbf{G}_q 为等值电导矩阵, $\mathbf{G}_q = \mathbf{QZ}_m^{-1}\mathbf{P}^{-1}$; \mathbf{I}_a 和 \mathbf{I}_b 为等值电流源。由式(24)、式(25)可以看出, 利用矩阵变换可以实现多条长线解耦, 且节点处每一步长都进行电压和电流的矩阵变换, 并得到新的等值电流源。

1.2 多能源长输电线仿真的问题分析

1) 由 1.1 节分析可知, 传统的迭代步长计算方法适用于规模较小的电磁暂态仿真, 但现阶段研究往多能源大电网方向发展, 当利用 1.1 节的方法对多能源大电网进行仿真研究时, 由于大电网节点增加引起解耦计算量呈指数形式增加, 导致仿真效率降低甚至出现 CPU 过载的情况。

2) 1.1 节中对长输电线的等值模型进行等效时, 需要每一步长逐次进行递推计算, 该方法为串行计算, 灵活性较差。

3) 传统等值模型的计算过程由于解耦计算量大且是串行计算, 数据传输时存在延时导致仿真精度低。

2 多能源长输电线系统的模型分割及接口算法实现

针对 1.1 节和 1.2 节的分析可知, 传统长输电线等值计算过程存在计算量大、效率低、灵活性差、传输延时等问题。本节在 1.1 节的基础上对 TLM 接口算法进行分析, 并设计出具有延时补偿策略的 TLM 模型接口, 同时将通过 TLM 分割后的各子系统在 UREP_300 和 RT-LAB 中进行并行联合实时仿真, 然后定义 TLM 接口分割线的最小长度。

2.1 TLM 接口算法分析

2.1.1 分割接口计算时序

对多能源长输电线系统进行分割时, 分割时序的选择对于系统中数据通信速率至关重要, 以多能源长输电线整体模型分割成两个系统为例, 分别进行串行和并行分割接口时序分析, 串行接口时序如图 4 所示。

其仿真过程如下:

1) 假设 T_0 时刻为仿真开始时间, 系统一和系统二从 T_0 时刻运行到 T_1 时刻;

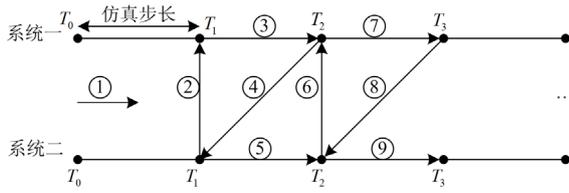


图 4 串行计算时序

Fig. 4 Serial calculation timing

2) T_1 时刻, 系统二将仿真得到的电流电压信息传递给系统一;

3) 系统一收到系统二的数据电压电流信号后, 在系统一内部进行一个步长的仿真计算;

4) 系统一计算到 T_2 时, 将过去一个步长计算得到电压电流信号传递给系统二;

5) 系统二收到系统一传来的电压电流信号后进行下一个仿真步长计算;

6) 重复步骤 2) 步骤 5), 直至仿真结束或系统中初始条件发生改变。

串行计算中, 尽管对系统进行解耦处理, 但计算只能在一个 CPU 中进行, 通信速率慢, 限制了系统的仿真规模以及仿真速度。

对于并行计算时序, 分割并行计算时序如图 5 所示。

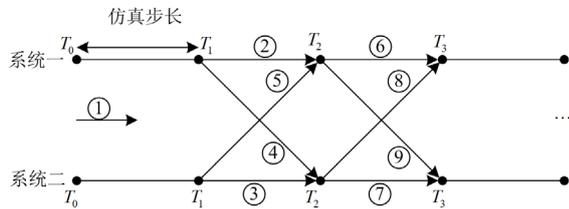


图 5 并行计算时序

Fig. 5 Parallel computing timing

其仿真过程如下:

1) 假设 T_0 时刻为仿真开始时间, 系统一和系统二从 T_0 时刻运行到 T_1 时刻;

2) T_1 时刻, 系统一和系统二分别进行一个步长的计算, 如图 5 中②、③所示;

3) 系统一将计算得到的电压电流信号传递给系统二, 同时系统二将计算得到的电压电流给系统一, 如图 5 中④、⑤所示;

4) 在 T_2 时刻, 各系统将得到的电压电流信号进行各自计算, 求解出联立系统中所需的电压电流;

5) 将求解出来的电压电流量传递给所需子系统, 同时接收来自其他子系统传递的电压电流;

6) 重复步骤 2) 步骤 5), 直至仿真结束或系统

中初始条件改变。

由以上分析可知, 并行计算时序能进行多核联合仿真, 能有效地适用于大规模仿真, 并且由于数据同时交互能提升仿真速度, 依据并行时序原则, TLM 分割模型接口设计采用并行时序搭建。

2.1.2 分割接口计算延时及线路分割最小长度

由于传统的电磁暂态计算是逐步长的迭代过程, 且该过程中存在延时, 导致仿真精度较低。对式(24)进行改进得到

$$\begin{cases} I_{ab}(t) = QZ_m^{-1}P^{-1}u_a(t) + QI_{m,a} + f(t) \\ I_{ba}(t) = QZ_m^{-1}P^{-1}u_b(t) + QI_{m,b} + f(t) \end{cases} \quad (26)$$

式中, $f(t)$ 为引入的补偿延时函数, 分割模型接口建立时引入补偿延时函数。

当用式(26)对 TLM 接口建模时, 由于电压电流在输电线上以电磁波进行传输, 波延线路传输需要时间, 由式(13)可知, 当采用波动算式描述长输电线时, 电磁波在线路上的传输时间 τ 大于等于仿真步长 Δt , 且长输电线两端的网络分割后仿真才有效, 即

$$\tau \geq \Delta t \quad (27)$$

假设式(27)中 τ 为 50 ms(模型文件离线与实时仿真步长均为 50 ms)时, 电磁波的传播速度近似为光速, 则线路的分割长度必须大于等于 15 km, 即分割线最小长度视仿真步长而定。

2.1.3 TLM 接口算法计算流程

由 2.1.1 节和 2.1.2 节分析可知, 当前步长的电压电流是由上一步长的电压电流迭代而得, 同时更新得到新的状态方程, 图 6 为仿真接口算法流程图。

其接口计算步骤如下:

1) 模型初始运行时读入原始数据建立原始计算方程;

2) 当网络方程确定后, 判断仿真步长 Δt 与传输时间 τ 的关系;

3) 当 $\tau \geq \Delta t$ 时, 建立电导矩阵, 并计算分割节点处电流;

4) 计算得到的节点处电流用于更新式(26)的右端项;

5) 当前时刻仿真时间小于总仿真时间时, 进行下一个仿真步长的计算;

6) 判断下一个仿真步长的初始条件是否改变, 如果改变则需要更新系统拓扑结构, 进行其他工况仿真;

7) 重复步骤 1) 步骤 6) 直至仿真结束。

2.2 TLM 接口算法实现

在 2.1 节中 TLM 模型接口引入的延时补偿能够解决传统仿真中的传输延时问题; 模型接口分割时

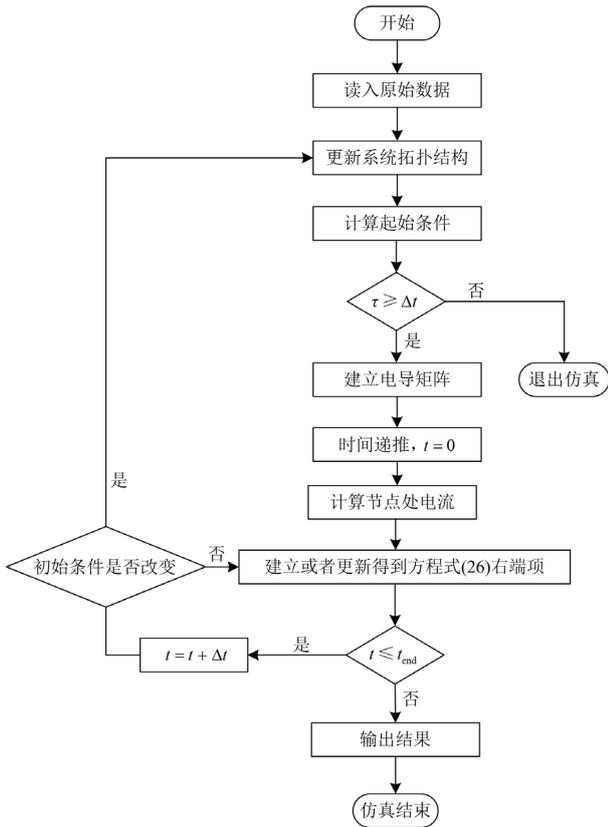


图 6 接口算法流程图

Fig. 6 Interface algorithm flowchart

采用并行时序实现数据交互，数据通信加快，仿真效率提升；由于多源长输电系统经 TLM 分割后进行多核仿真，大大降低了 CPU 的运行占有率，提升了仿真速度。本节首先介绍多核 UREP_300 实时仿真平台的搭建及简述 RT-LAB 实时仿真平台，然后实现 TLM 模型接口在实时仿真平台中运行。

2.2.1 实时仿真平台搭建

UREP_300 为自主研发的实时仿真平台，具有自主可控的全部核心技术，支持 Matlab/Simulink 建模，在电力仿真领域应用较多，可以替代 RTDS、RT-LAB 等进口设备^[24]。如图 7 所示，在主控机的仿真软件上建立整个长输电的全拓扑电磁仿真模型，当模型达到预设要求后，对模型编译并读入 UREP_300 仿真机中进行实时仿真。仿真平台包括主控机与实时仿真机，主控机负责离线建模，实时监控、调参，对模型进行验证等，同时可以在主控界面观察模型的运行工况；主控机与实时仿真机通过局域网通信，如图 8 所示。图 9 为实时仿真平台基础架构，实时仿真机中主要包含多核的处理主板、智能化 I/O 接口等，实时仿真平台具有良好的用户交互性。

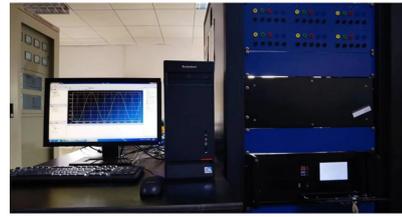


图 7 主控机与实时仿真机

Fig. 7 Main control machine and real-time simulator

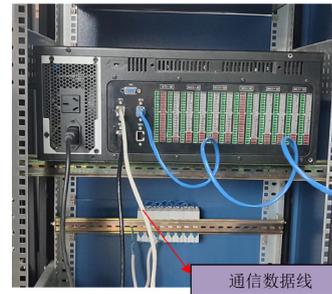


图 8 实时仿真平台通信

Fig. 8 Real-time simulation platform communication

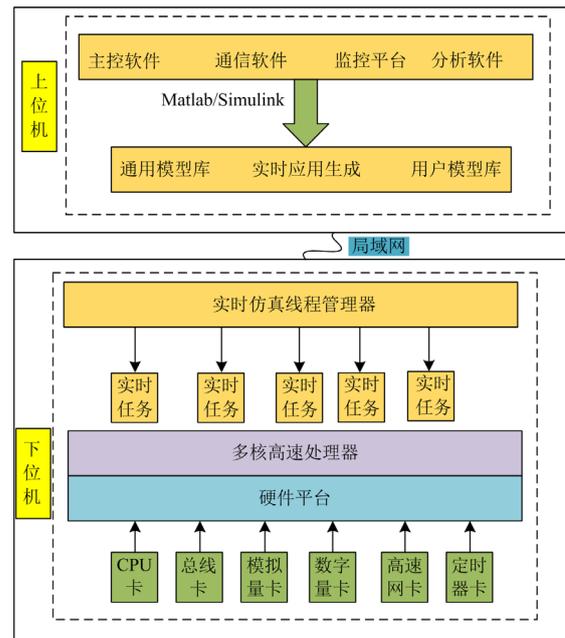


图 9 仿真平台基本组成原理

Fig. 9 Basic composition principle of simulation platform

2.2.2 RT-LAB 实时仿真平台简介

RT-LA 是一款基于模型工程的设计和测试平台，它主要由主机、目标机和硬件系统组成，其中上位机为工控计算机，是一台具有 Windows 系统的电脑，工控机中装有 Matlab 和 RT-LAB 软件，利用 Matlab/Simulink 建立模型，而 RT-LAB 的主要任务是重新封装模型，并将模型下载到目标机中，

同时承担控制启停、监控和在线调试等任务^[25]。图 10 为 RT-LAB 实时仿真环境图。

本仿真平台主要由 RT-LAB 目标机 OP5707、电源和 RT-LAB 上位机等组成, 上位机与 RT-LAB 通过 TCP/IP 通信; 目标机 OP5707 是 OPAL-RT 公司推出的专用仿真设备, 其具有模块化和灵活性等特点, 拥有较好的兼容性。

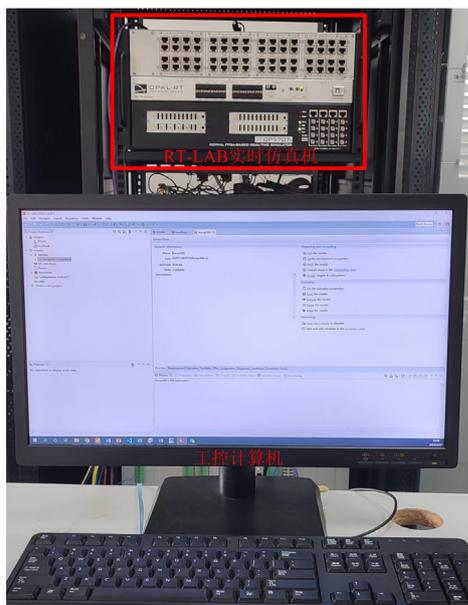


图 10 RT-LAB 实时仿真环境图

Fig. 10 RT-LAB real-time simulation environment diagram

2.2.3 模型算法在 UREP_300 和 RT-LAB 中实现

多能源长输电线系统经 TLM 分割后, 编译各个子系统并下载到 2.2.1 节搭建好的实时仿真平台 UREP_300 中进行联合仿真, 实时仿真流程如图 11 所示。

实时仿真步骤如下:

- 1) 将分割的子系统放到对应的 UREP_300 核中;
- 2) CPU 对各个子系统进行初始化计算, 此时的模型接口需要从对侧获得电压电流, 并把本侧的电压电流送入对侧子系统;
- 3) 各子系统根据得到的电压电流进行解算, 对网络方程进行迭代;
- 4) 当本次计算完毕后, 实时仿真机更新各子系统历史数据, 进行下一个仿真时刻的计算;
- 5) 重复步骤 2)一步骤 4)直至仿真结束, 得到仿真结果。

TLM 接口算法在 RT-LAB 中的实现过程与在 UREP_300 中的实现过程类似, 不同点在于 Simulink model 模型顶层中只允许有一个主系统, 而且系统以 SC_、SM_、SS_来命名, 其中 SC_系统用来观

测波形, SM_、SS_用来运算, 系统与系统之间需要用 OpComm 进行连接。

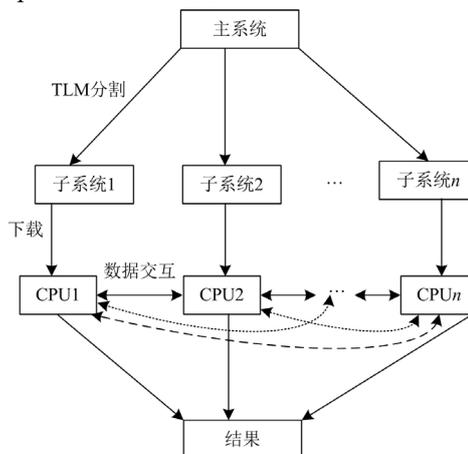


图 11 拓扑仿真结构

Fig. 11 Topology simulation structure

3 算例分析

3.1 仿真算例分析

对某实际区域多能源多电压等级的长输电线系统建立模型, 并对系统进行离线与实时仿真。线路中一共有 4 个电压等级分别为 500 kV、220 kV、110 kV 和 35 kV; 光伏的装机容量为 50 MW; 风机的装机容量为 48 MW。

在主控机中使用 Matlab/Simulink 离线建模仿真, 系统中有若干条分布式接线, 模型的解算步长为 50 ms, 采用 Euler 算法。

在离线仿真中, 为了验证 TLM 分割模型的正确性, 分别对不同电压等级分割前后的电压 U_r 、电流 I_r 、功率 P_r 的波形进行对比。如图 12(a)所示, 系统分割前后电压稳定且维持在 230 kV; 图 12(b)中分割前后电流稳定在 4.4 kA; 图 12(c)中分割后的有功功率 P_r 初始时刻跳动比较大, 经过短暂过渡, 最终稳定的额定功率为 1153 MW, 以上仿真结果说明, 所建的多能源长输电线系统能够在 220 kV 侧稳定运行, 且能达到预期的效果。

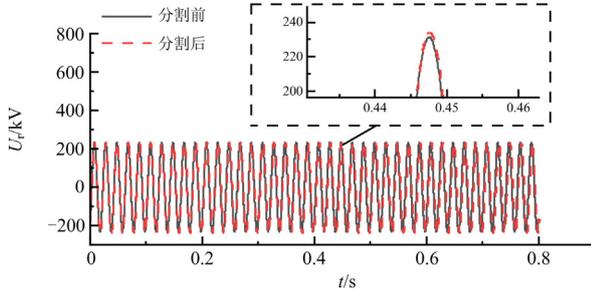
为了进一步验证分割模型的准确性, 引入以下两种工况对比电压、电流和功率波形:

工况 1: 观察 110 kV 侧的分割情况。图 13 分别为 110 kV 侧分割前后的电压、电流和功率波形。需要注意的是, 在系统刚启动的瞬间, 系统需要经历一个短暂的暂态过程, 表现形式为波形波动较大, 如图 13(c)中分割后的功率一开始高达 65 MW, 经过短暂的过渡时间最终稳定在 35 MW。

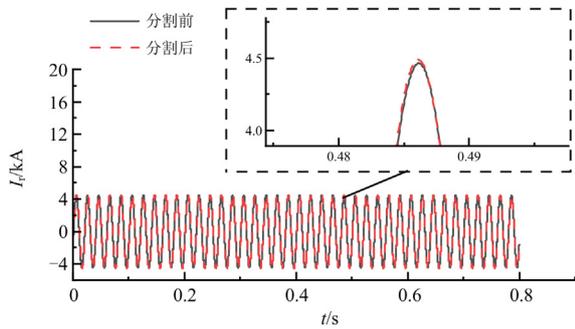
工况 2: 模拟系统在 9 s 时发生 AB 两相接地短路故障, 且持续时间为 0.5 s。 U_r 、 I_r 和 P_r 的波形如

图 14 所示。

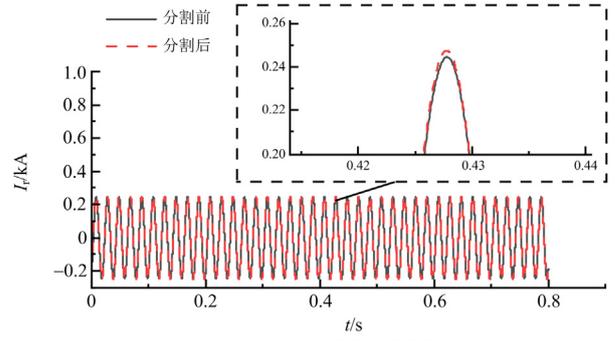
从离线稳态和暂态仿真结果可以看出，使用分布式接线与设计的 TLM 接口算法用于多能源长输电系统时的仿真参数基本一致。



(a) A相电压对比图



(b) A相电流对比图

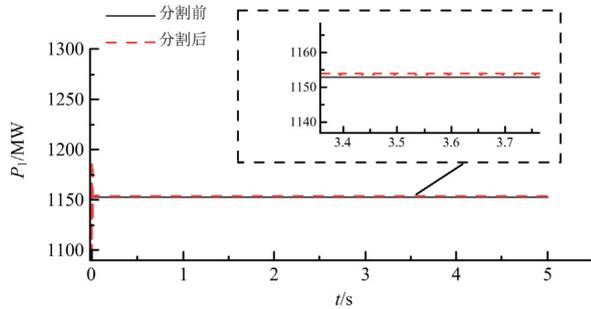


(b) A相电流对比图

(c) 功率对比图

图 13 110 kV 侧仿真对比

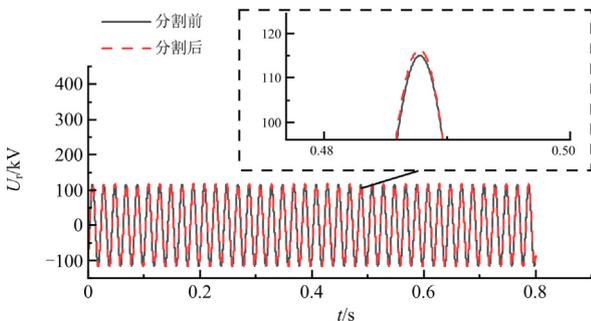
Fig. 13 Simulation comparison of 110 kV side



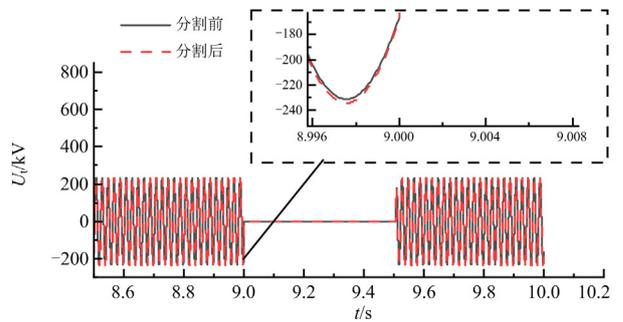
(c) 功率对比图

图 12 220 kV 侧仿真对比

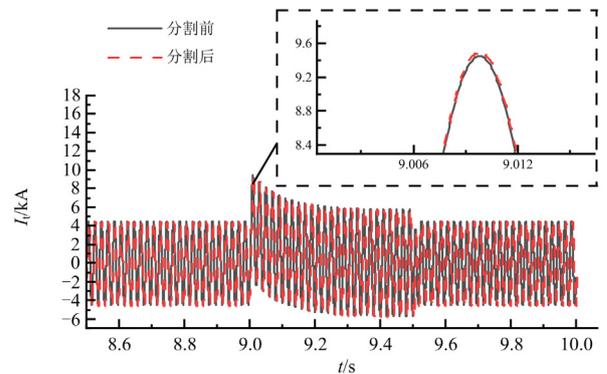
Fig. 12 Simulation comparison of 220 kV side



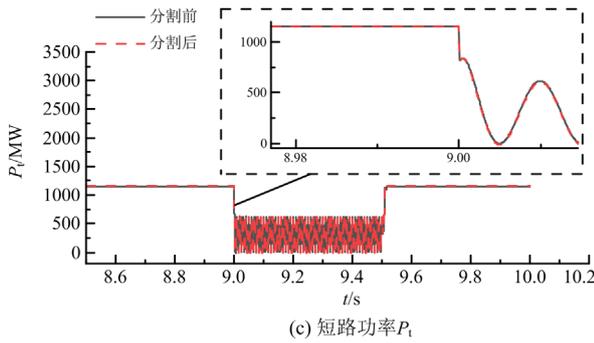
(a) A相电压对比图



(a) A相电压 U_A



(b) A相电流 I_A

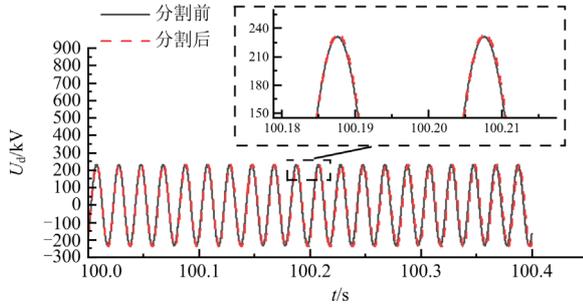


(c) 短路功率 P_4

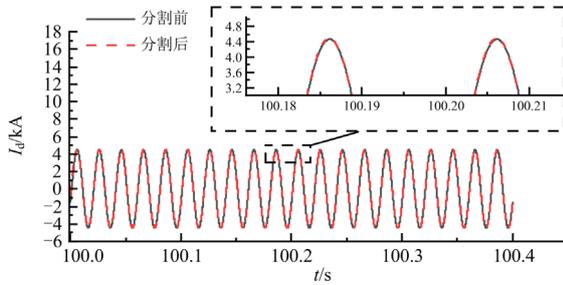
图 14 暂态仿真对比

Fig. 14 Comparison of transient simulation

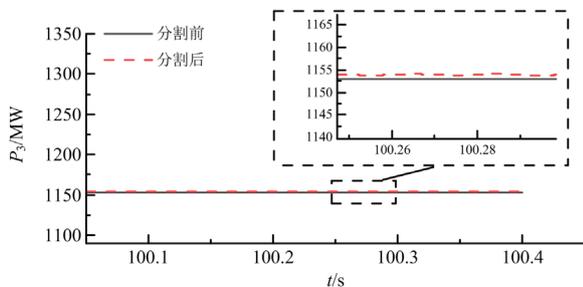
对大系统进行离线仿真时发现仿真效率低, 且设备出现卡顿等问题; 进一步将模型编译下载到 UREP_300 实时仿真平台上验证系统经 TLM 分割后的正确性, 由图 15 可以看出, 当模型实时运行 100 s 时, 电压 U_d 、电流 I_d 和功率 P_3 波形几乎重合。



(a) A相电压实时仿真波形



(b) A相电流实时仿真波形

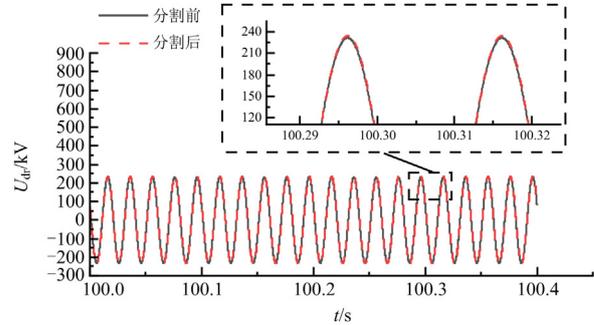


(c) 实时仿真功率波形

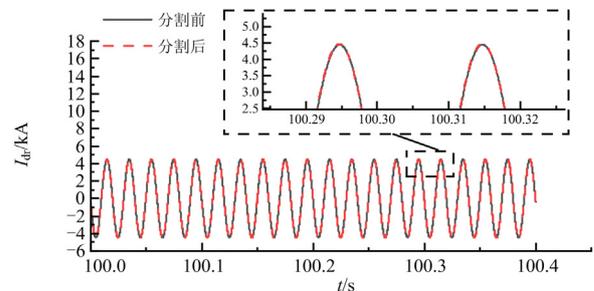
图 15 UREP_300 实时仿真对比

Fig. 15 UREP_300 real-time simulation comparison

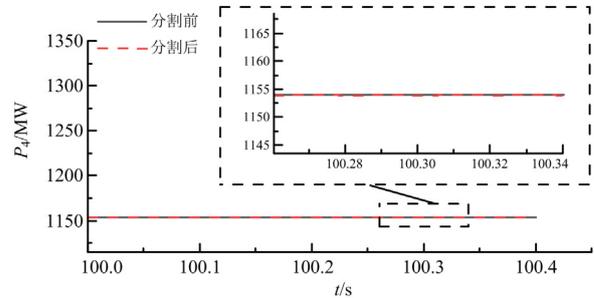
为进一步验证分割模型的正确性, 将模型编译下载到 RT-LAB 实时仿真平台进行仿真, 由图 16 可以看出, 当模型实时运行至 100 s 时, 电压 U_{dr} 、电流 I_{dr} 和功率 P_4 波形与 UERP_300 基本一致。



(a) A相电压实时仿真波形



(b) A相电流实时仿真波形



(c) 实时仿真功率波形

图 16 RT-LAB 实时仿真对比

Fig. 16 RT-LAB real-time simulation comparison

根据实时仿真与离线仿真可以得出以下结论:

- 1) 离线仿真波形与实时仿真波形基本一致, 说明 TLM 数学模型适用于多能源长输电系统分割;
- 2) TLM 对多能源长输电系统进行等值时, 可以在一定程度上加快仿真速度;
- 3) 分别在实时仿真器平台 UERP_300 与 RT-LAB 并行仿真时, 得到的结果基本一致, 且 CPU 不会出现过载的情况。

3.2 硬件资源消耗对比

表 1 为不同工况下 CPU 的使用率, 可以看出未

分割的模型仿真时间较长, CPU 的占有率较高, 表 1 中实时仿真时出现的误差率是由于实时仿真机中硬件通信出现细微的延时, 但误差在允许的范围内。

将模型进行 TLM 分割并在实时仿真机中仿真, 此时的模型状态是一个子系统对应一个核, 在较大程度上减轻了 CPU 的解算负担, 能有效地节约仿真时间, 提高仿真效率。

表 1 系统工况对比

Table 1 Comparison of system working conditions

模型类型	仿真类型	CPU 数	设置的仿真时间 (实际总耗时)	CPU 占有率/%	误差率/%
全拓扑模型	全系统	1	5 s(4 h)	92	0
	工况 1 (UREP)	3	100 s(100 s)	24	0.5
分割模型	工况 2 (UREP)	3	15 s(15 s)	22	0.3
	工况 1 (RT-LAB)	3	100 s(100 s)	27	0.4
	工况 2 (RT-LAB)	3	15 s(15 s)	23	0.5

4 结论

对含有大量长线的多能源多电压等级长输电系统进行仿真时, 由于多能源不断的接入, 导致电网运行工况复杂, 从而使得对大规模的多能源长输电系统进行仿真变得困难。基于该亟待解决的问题, 依据长输电线路模型法原理设计出适用于多能源长输电线路实时仿真的模型接口, 通过接口调制信号控制两端受控电压源与电流源同时进行数据交互, 实现系统的解耦降阶, 同时在该方法引入补偿延时, 能有效地解决仿真中出现的延时问题, 模型经 TLM 分割后有效地规避了一个 CPU 对一个大系统解算时发生重载运算的问题。仿真结果表明: TLM 模型接口算法无论是实时仿真还是离线仿真都较大幅度地提高了仿真效率, 且在稳态和暂态条件下离线与异构实时仿真平台的结果基本一致, 有效地解决了较大规模多能源多电压等级长输电系统难以进行实时仿真的问题。

参考文献

[1] 辛保安, 郭铭群, 王绍武, 等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 1-8.
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.

[2] 韩杰. 基于计算机仿真的新能源接入电网机电暂态分

析[J]. 太阳能学报, 2022, 43(8): 517-518.
HAN Jie. Electromechanical transient analysis of new energy access power grid based on computer simulation[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(8): 517-518.

[3] 王灿. 考虑大规模新能源接入的电网规划评价指标研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
WANG Can. Research on evaluation index system of power grid planning considering the access of large-scale new energy[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.

[4] 王建学, 李清涛, 王秀丽, 等. 大规模新能源并网系统电源规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3114-3124.
WANG Jianxue, LI Qingtao, WANG Xiuli, et al. A generation expansion planning method for power systems with large-scale new energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3114-3124.

[5] 韩先才, 孙昕, 陈海波, 等. 中国特高压交流输电工程技术发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4371-4386, 4719.
HAN Xiancai, SUN Xin, CHEN Haibo, et al. The overview of development of UHV AC transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4371-4386, 4719.

[6] 潘志城, 邓军, 周海滨, 等. 特高压多端混合直流输电工程柔直变压器的振动特性研究[J]. 高压电器, 2022, 58(1): 122-129.
PAN Zhicheng, DENG Jun, ZHOU Haibin, et al. Research on vibration characteristics of flexible DC transformer in UHV multi-terminal hybrid DC transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(1): 122-129.

[7] 李亚楼, 张星, 胡善华, 等. 含高比例电力电子装备电力系统安全稳定分析建模仿真技术[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 33-42.
LI Yalou, ZHANG Xing, HU Shanhua, et al. Modeling and simulation technology for stability analysis of power system with high proportion of power electronics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 33-42.

[8] 周佩朋, 孙华东, 项祖涛, 等. 大规模电力系统仿真用新能源场站模型结构及建模方法研究(三): 电磁暂态模型[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 2990-3000.
ZHOU Peipeng, SUN Huadong, XIANG Zutao, et al. Research on model structures and modeling methods of renewable energy stations for large-scale power system simulation (III): electromagnetic transient models[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 2990-3000.

[9] 闵晓晴, 冯琳, 李国杰, 等. 含柔性并网装置的半波长输电线路多结构并网研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 31-38.
MIN Xiaoqing, FENG Lin, LI Guojie, et al. Study on multi-structure grid-connection of half-wavelength transmission line with flexible grid-connection device[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 31-38.

[10] 罗建民, 戚光宇, 何正文, 等. 电力系统实时仿真技术

- 研究综述[J]. 继电器, 2006, 34(18): 79-86.
LUO Jianmin, QI Guangyu, HE Zhengwen, et al. Research on power system real-time simulation[J]. Relay, 2006, 34(18): 79-86.
- [11] 姜赫, 安军, 李德鑫, 等. 基于 WAMS 实测数据的电力系统仿真致差区域识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 96-103.
JIANG He, AN Jun, LI Dexin, et al. Recognition method of power system simulation error area based on WAMS measured data[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 96-103.
- [12] HEFFERNAN M D, TURNER K S, ARRILLAGA J. Computation of AC-DC system disturbances, part I, II and III[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(11): 4341-4363.
- [13] 吴国暘, 戴汉扬, 宋新立, 等. 适用于复杂拓扑结构混合直流电网的实用机电暂态建模仿真方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 170-180.
WU Guoyang, DAI Hanyang, SONG Xinli, et al. A practical electromechanical transient simulation method for complicated topological hybrid HVDC grids[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 170-180.
- [14] 何剑, 孙华东, 刘明松. 基于扩展状态空间分割法的含风电场电力系统运行备用风险评估[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 257-263.
HE Jian, SUN Huadong, LIU Mingsong. Extended state-space partitioning based operating reserve risk assessment for power grid connected with wind farms[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 257-263.
- [15] 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.
- [16] 熊玮, 夏文龙, 余晓鸿, 等. 多核并行计算技术在电力系统短路计算中的应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 49-52, 86.
XIONG Wei, XIA Wenlong, YU Xiaohong, et al. Multi-core parallel computation technique for power system short-circuit faults analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 49-52, 86.
- [17] 王健, 陈威, 汤卫东, 等. 分布式并行网络拓扑计算关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 117-122.
WANG Jian, CHEN Wei, TANG Weidong, et al. Research on the key technologies of distributed parallel network topology computing[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 117-122.
- [18] 童开蒙, 杨镜非. 电力系统分块网络拓扑法的建模分析[J]. 电气自动化, 2014, 36(3): 67-70.
TONG Kaimeng, YANG Jingfei. An analysis on the modeling of partitioned network topology in a power system[J]. Electrical Automation, 2014, 36(3): 67-70.
- [19] 王语园, 惠亮亮, 王江彬. 特高压交流电力线路仿真模型的创建[J]. 无线互联科技, 2020, 17(5): 121-122.
WANG Yuyuan, HUI Liangliang, WANG Jiangbin. Establishment of simulation model for UHV AC transmission line[J]. Wireless Internet Technology, 2020, 17(5): 121-122.
- [20] 苏欣, 杨超, 张婉婕, 等. 基于 PSCAD 的特高压交流输电系统仿真模型[J]. 山东电力技术, 2016, 43(8): 15-19, 34.
SU Xin, YANG Chao, ZHANG Wanjie, et al. Modeling and simulation of UHV AC transmission system based on PSCAD[J]. Shandong Electric Power, 2016, 43(8): 15-19, 34.
- [21] 杜杰, 李子润, 李国杰. 海上风电直流汇集 DC/DC 系统实时仿真方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 170-177.
DU Jie, LI Zirun, LI Guojie. Real-time simulation method for a DC/DC collection system in an offshore wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 170-177.
- [22] 胡永昌, 李泰, 曹森, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的特高压直流输电系统并行仿真研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 178-186.
HU Yongchang, LI Tai, CAO Sen, et al. Research and application of parallel simulation of a UHVDC system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17): 178-186.
- [23] 夏道止. 电力系统分析(下册)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.
- [24] 娄贵方, 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. An accelerated method for full topology real-time simulation of large-scale wind farms[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(10): 20-27, 67.
- [25] 贾广东. 基于 RTLAB 的多能互补微网构建及运行控制研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
JIA Guangdong. Research on construction and operation control of RTLAB based multi-energy complementary microgrid[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.

收稿日期: 2023-04-18; 修回日期: 2023-06-15

作者简介:

燕 豪(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析及多能源系统构建与仿真; E-mail: yanhao1359@163.com

陈 卓(1980—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定与控制、电力系统实时仿真等。E-mail: chzh1230@163.com

(编辑 许 威)