

基于受控源映射和传输线分割的风电场快速仿真模型

王 焱, 邹 明, 许建中, 赵成勇

(新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 随着风力发电技术的发展, 风电规模不断增大, 风电与电网的相互影响也越来越复杂, 对大规模风电场群开展仿真研究十分重要。然而, 大规模风电场群包含数百台机组, 这使得详细模型的仿真极其困难。为了提高仿真速度, 常常将风电场群利用单机或多机法进行等值处理, 但这类等值模型削弱了风电系统的可调性、灵活性, 适用性较为局限。针对上述问题, 提出了一种风电场群的快速仿真方法, 该方法首先利用单步时延受控源映射, 将单个风场分解为多个子系统, 从而将高维度的导纳矩阵转换为多个低维度的小矩阵同时求解; 其次, 充分考虑 35 kV 送出馈线较长的特性, 结合长输电线解耦法对各风电场进行并行计算。仿真结果表明, 所提方法可较为准确地反映风电场群的暂稳态特性, 并显著缩短了仿真时间, 提高了仿真效率。

关键词: 大规模风电场群; 详细模型; 仿真速度; 受控源映射; 长输电线

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2691 (2026) 02-0077-08

Fast Simulation Model for Wind Farms Based on Controlled Source Mapping and Transmission Line Segmentation

WANG Yan, ZOU Ming, XU Jianzhong, ZHAO Chengyong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: With the advancement of wind power technology, the scale of wind power generation continues to expand, and the interaction between wind power and the power grid is becoming increasingly complex. Therefore, conducting simulation studies on large-scale wind farms is crucial. However, large-scale wind farms consist of hundreds of units, making detailed model simulations extremely challenging. To enhance the simulation speed, wind farms are often equated using the single or multi-machine equivalence methods. However, such equivalence models reduce the adjustability and flexibility of the wind power system, limiting their applicability. Aiming at the above problems, a fast simulation method for wind farms is proposed. First, a single-step time-delay controlled source mapping is employed to decompose a single wind farm into multiple sub-systems, thereby transforming the high-dimensional admittance matrix into multiple low-dimensional submatrices for simultaneous solution. Second, considering the long 35kV transmission lines, a decoupling method for long transmission lines is integrated to enable parallel computation of each wind farm. Simulation results show that the proposed method accurately reflects the transient and steady state characteristics of wind farms while significantly reducing simulation time and improving efficiency.

Key words: large-scale wind farms; detailed models; simulation speed; controlled source mapping; long transmission lines

0 引言

随着风电装机容量在电力系统中所占的比重不断增大, 未来新型电力系统的“源网荷储”各环节

节将高度电力电子化^[1]。风电机组是将风能转换为电能的基本单元,也是风电场群及并网系统正常运行的基本保证。风电机组以及机组与并网系统的动态特性之间存在着很强的耦合,在分析场群与并网系统间振荡、机组间谐振等问题时,需对风电场群展开精确仿真,以观测每台机组的详细内部特性。然而,风电场中包含大量的电力电子器件,开关动作频繁,搭建全详细的电磁暂态模型无法兼顾仿真规模、精度和效率。

为了实现大规模的风电场群电磁暂态快速仿真,通常采用等值方法进行处理。文献[2]以双馈风电机组为研究对象,通过风速分组和合并等值描述风电场内部的风速分布和尾流效应,得到了风电场的多机等值模型。文献[3]在单机等值的风电场模型的基础上,采用选择模态分析方法,将风电场模型阶数降至一阶,大大减少了计算复杂度。文献[4]提出了一种直驱式风电机组的等值算法,通过分群、风力机参数等值和集电线路静态等值得到了风电场等值模型。文献[5-6]提出了一种基于戴维南/诺顿等效的风电机组等效模型,该模型能够在保证仿真精度的前提下大幅提高仿真速度。文献[7]结合 K-means 聚类算法和遗传聚类算法的优点,利用实测风速数据作为分群指标,建立了风电场的动态等值模型。文献[8-10]分别针对风电场的次同步振荡特性、短路故障特性和 LVRT 期间的无功功率特性建立了适用于不同研究场景的风电场等值模型。文献[11]通过计算风电场的主导特征根得到了风电场的分群指标,并结合非线性分析方法研究了风机扰动后动态参数的变化。上述文献根据所关注风电场的问题特性对风电场进行了不同程度的简化处理,模型在等值后只能保留近似的外部特性,在系统级层面,这类等值方法能够较为准确地反映风电场与电力系统的交互特性;但在场群研究层面,获取风电机组等值模型的参数需要大量的实测和数据处理,不同风电机组的结构和控制策略存在差异,因此导致了这类等值方法的灵活性低、适用性差。

此外,对于大规模风电场的电磁暂态仿真,并行算法和合适的硬件平台可以显著提高仿真效率。Zenotech 公司利用 NVIDIA GPU 模拟了含 140 台机组的风电场仿真^[12],在保证高精度的前提下,快速获得了仿真结果。文献[13-14]利用前向欧拉法,采用一步延时对系统中的电感和电容

进行计算,得到了电力电子装置的解耦模型,但这种解耦模型仿真精度不高,开关动作时可能会产生数值振荡。文献[15]利用半隐式延迟解耦方法提出了风电机组内部的子系统模型,通过设计计算时序,实现了子系统间的并行计算。文献[16]基于集群平台、分块思想,提出了一种多重化网络划分方案,以改善传统算法中的仿真计算规模和速度。文献[17]基于动态多线程的网络分层算法,实现了大规模集群系统的电磁暂态并行仿真。上述文献虽然在一定程度上解决了电网仿真效率问题,但是这些并行算法设计难度高,对硬件平台有着较为严格的要求。

基于上述问题,本文基于电路分析中的替代定理提出了一种单步时延受控源映射法,该方法利用受控电压源和受控电流源作为信号接口,将大系统分割,实现风场内部各机组间解耦;其次,依据风电场群 35 kV 送出馈线相对较长的特性,利用长输电线路解耦原理将各风电场群进行拆分,实现多个风电场的并行计算。所提出的快速仿真方法可以准确仿真风电系统在不同工况下的运行特性,并能显著提高仿真速度。

1 风电场群基本结构

风电场群的交流集电系统拓扑结构主要包括链型、环形和星型布局^[18,19]。其中,链型布局是最常见和成熟的结构之一,链型布局布线简单^[20]、电缆长度相对较短,从而可以减少能量损耗和投资成本,被广泛应用于许多风电场^[21],如英国的 North Hoyle 风电场、瑞典的 Lillgrund 风电场和荷兰的 Gemini 风电场。

双馈风电机组由于具有变速运行、风能转换效率高等优点,已经成为目前商业化运行的主流机型之一^[22]。以双馈风电机组为发电单元,采用链型拓扑为例,说明风电场群的基本结构。

在图 1 中,发电机端口输出电压为 0.69 kV,经过逆变器、变压器升压后接入 35 kV 母线,最后通过 35/220 kV 变压器汇入交流系统。

2 快速仿真原理

2.1 单步时延受控源映射法

基于电路分析中的替代定理,将电路中的节点拆分,利用受控电压源和受控电流源将原系统拆分为多个互为映射的子系统。如图 2 所示的典型电路系统可利用该拆分方法将电路分割成两个

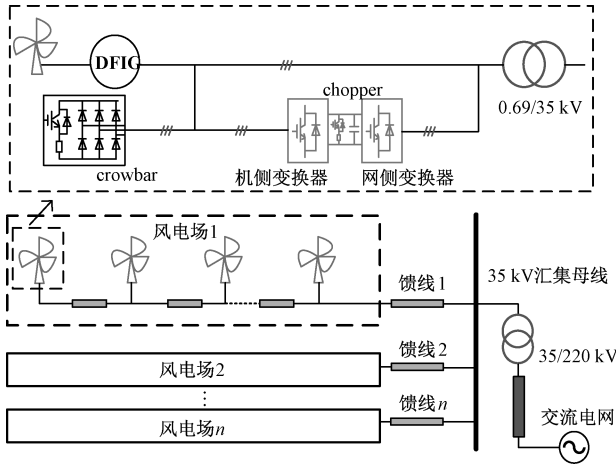


图1 风电场拓扑图

Fig. 1 Wind farm topography

子系统,分割后的拓扑如图3所示。

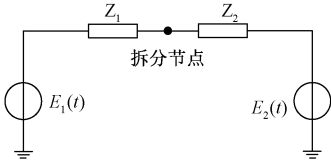


图2 典型电路系统

Fig. 2 Typical circuit systems

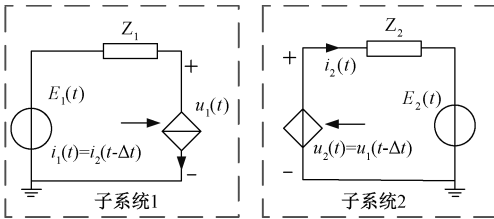


图3 分割示意图

Fig. 3 Division diagram

$E_1(t)$ 和 $E_2(t)$ 分别为子系统1和子系统2的戴维南等效电压, Z_1 和 Z_2 分别为两个子系统的等效阻抗。子系统1和子系统2通过电压、电流信号进行双向控制。将电路模型分割后,电磁暂态算法会自动求解各子系统的等效电路,最后将求解出的拆分节点处的电压、电流再分别赋值给各个子系统的受控源,因此在仿真步长上天然地相差一个时间步长。

子系统1将测到的拆分点处电压经过一个步长的时延传递给子系统2处的受控电压源作为输入,子系统2的支路电流也经过一个步长的时延作为子系统1受控电流源的输入。其仿真过程如图4所示。

显然,这种拆分方法引入了一个步长的时延,

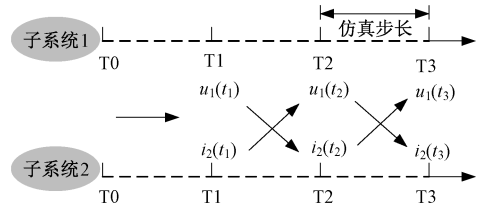


图4 仿真时序示意图

Fig. 4 Simulation timing schematic

但在小步长的仿真前提下,分割前后系统可认为完全等效,且时延信号可以避免各子系统的状态空间方程出现代数环,从而更好地模拟系统的动态响应特性。

2.2 长输电线解耦

长输电线路解耦法是一种基于分布参数线路特性的方法,电压和电流在线路中以电磁波的形式传输。电磁波在线路中的传播具有一定的时间延迟,当仿真步长小于电磁波的传输时间时,可以将线路在每个仿真计算时刻进行自然解耦^[23],实现网络分割。

对于一条单相输电线路,在给定频率下,忽略频率变化对线路电阻和电感参数的影响,线路两端为 j,k 两端点, t 时刻其电压、电流分别为 $u_j(t)$ 、 $i_j(t)$ 、 $u_k(t)$ 、 $i_k(t)$,设输电线路长为 l , L_0 、 C_0 分别为单位长度电感和单位长度电容,单相线路解耦模型如图5所示。

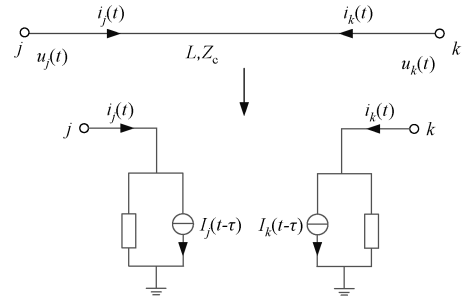


图5 单相线路解耦模型

Fig. 5 Single-phase line decoupling model

线路的波阻抗 Z_c 和沿线电磁波传播速度 v 分别为

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

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

假设电磁波从 j 点到 k 点所需的时间为 τ ,波在 $t-\tau$ 时刻从 j 端点出发, t 时刻到达 k 点,可得到解耦特性方程,如式(3)所示。

$$u_j(t-\tau) + i_j(t-\tau)Z_c = u_k(t) - i_k(t)Z_c \quad (3)$$

由式(3)变换可得

$$i_k(t) = u_k(t)/Z_c - u_j(t - \tau)/Z_c - i_j(t - \tau)$$

(4)

将式(4)后两项定义为等效电流源,见式(5)。

$$I_k(t - \tau) = -u_j(t - \tau)/Z_c - i_j(t - \tau)$$

(5)

以上, $i_k(t)$ 可用波阻抗 Z_c 与等效电流源 $I_k(t - \Delta t)$ 表示,同理, $i_j(t)$ 可用波阻抗 Z_c 与等效电流源 $I_j(t - \Delta t)$ 表示。等效电流源的值取决于上一个步长的电压、电流,解耦后的电路并无直接拓扑联系。通过长输电线自然解耦,每个子网只需要与前一步长的结果进行通信,且子网内部可以独立进行计算^[24],减少了串行计算的需求。

PSCAD V4.6 版本基于长输电线解耦原理提供了并行计算功能,能够将一个电气网络拆分成多个电气子网络,每个子网络用一个分离的 case 项目,使用单独的 EMTDC 进程运行,目前一个标准的 PSCAD 许可允许最多 8 个并行的 EMTDC 仿真。对风电场而言,各风电场可利用电气网络接口 (electric network interface, ENI) 划分为多个小区域网络。通过仿真设置功能建立不同的仿真组,属于同一风场的风电机组放置到一个计算核心中,不同风场可以独立地在不同的处理器核心中运行。这种方式能够充分利用计算系统中的多个计算核心,加速整个仿真过程。多项目并行时 PSCAD 与 EMTDC 的交互如图 6 所示。

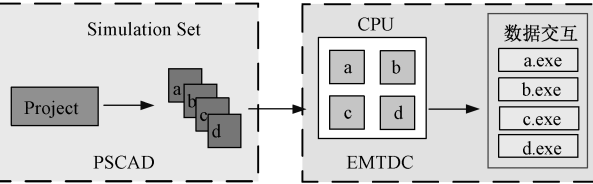


图 6 PSCAD 与 EMTDC 的交互

Fig. 6 Interaction between PSCAD and EMTDC

考虑到长输电线解耦的局限性,为了实现解耦效果,仿真步长应该小于传输线的传播时延,在仿真步长为 $5\text{ }\mu\text{s}$ 时,传输线长度应大于 1.5 km ,而单个风电场中与并网母线连接的风机线路距离相对较长,约为 2 km 左右,满足解耦要求。

3 在风电场中的应用

基于 2.1 节的受控源映射拆分原理和 2.2 节长输电线解耦方法,提出一种风电场的快速仿真方法。快速仿真模型如图 7 所示。

首先,利用受控源映射方法,将节点信息由上

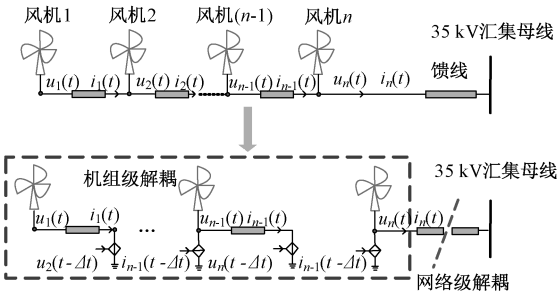


图 7 风电场快速仿真模型

Fig. 7 Fast simulation model for wind farms

一步长的电压、电流代替,虽然这种映射方法会多余引入 $n-1$ 个节点,但可以将风电场拆分为 n 个子系统,每个子系统对应一个风电机组,这种映射方法使得仿真计算可以按照机组级进行并行计算;其次,利用长输电线自然解耦的特性,利用 PSCAD V4.6 软件将不同的风电场放置到多个计算核心中,每个风电场独立于送出系统进行仿真计算,通过 ENI 接口进行电气交互,实现多核并行计算,从而降低仿真负担。

4 仿真实验验证

为了验证所提快速仿真方法的有效性,在 PSCAD/EMTDC 中按照图 1 拓扑搭建了包含 9 台风电机组,共 3 条链路,每条链路分布 3 台机组的的风电场仿真模型。风电场的主要参数如表 1 所示。

表 1 风电场仿真模型主要参数

Tab. 1 Main parameters of the wind farm model

类别	符号	参数	数值
发电机	S_{bDFIG}	额定容量/MVA	2.5
	U_{bDFIG}	额定电压/kV	0.69
	f_{bDFIG}	额定频率/Hz	50
	S_{bFRC}	额定容量/MVA	2.5
换流器	U_{bFRC}	直流母线电压/kV	1.45
	C	直流侧电容/ μF	7 500
	f_s	开关频率/Hz	3 800
0.69/35 kV 变压器	S_{bT}	额定容量/MVA	2.5
35/220 kV 变压器	S_{bNT}	额定容量/MVA	200

基于本文所提风电场快速仿真方法,对以下 3 类风电场模型进行分析。模型 1:全详细模型 (detailed model, DM),对风电场不做任何处理,放置到一个计算核心中进行仿真解算;模型 2:分割模型 (split model, SM),将风电场利用受控源映射分割方法将风电场中的机组进行拆分,放置到一个计算核心中进行仿真解算;模型 3:并行分割模型 (parallel split model, PSM),在模型 2 的基础上,

利用 PSCAD 的仿真设置功能将不同的风场模型放置到不同的计算核心中仿真解算。

4.1 模型精度验证

1) 启动阶段

图 8 给出了 DM、SM、PSM 在启动阶段的输出有功功率、无功功率、交流电压及机端直流电压波形图。在 0~0.4 s 时,风电机组断路器处于断开状态,有功功率输出接近于 0,而风电机组控制策略要求无功功率在启动时段有一定抬升,维持电网电压稳定性。0.4~0.6 s,网侧换流器解锁,0.6 s 后,机侧换流器解锁,风电场各电气量逐渐进入额定运行状态。

三类模型的仿真波形几乎完全重合,与 DM 相比,SM、PSM 有功功率的最大相对误差分别为 0.86%,1.78%;风电场交流电压的最大相对误差分别为 0.34%,0.49%。由仿真结果可知,所提出的两类加速模型均具有较高的仿真重合度。

2) 稳态阶段

图 9 给出了 DM、SM、PSM 在稳态的输出有功功率、无功功率、交流电压及机端直流电压波形图。

稳态运行期间,详细模型和两类加速模型表现出一致的波形特性,风电场输出的有功功率最终稳定在 18 MW 附近,与 DM 相比,SM、PSM 有功功率、机端直流电压的最大相对误差误差均在 0.1% 以内。

3) 故障阶段

图 10 给出了 DM、SM、PSM 在短路故障下的输出有功功率、无功功率、交流电压及机端直流电压波形图。

在 3.0 s 时,风电场交流出口发生三相接地短路故障,故障时间为 0.625 s。由图 10 可知,风电场输出交流电压在发生短路故障后迅速跌落,风电场输出有功功率降低,无功功率抬升,维持电压稳定,故障结束后,有功功率和无功功率逐渐恢复稳定。与 DM 相比,SM、PSM 有功功率的最大相对误差分别为 0.55%,0.19%;风电场交流电压的最大相对误差分别为 0.51%,0.65%。两类提速模型和 DM 的仿真结果几乎完全重合,在短路故障工况下的暂态波形几乎一致,进一步验证了两类加速模型的准确性。

4.2 仿真加速比测试

为了测试 SM、PSM 的仿真加速比,分别在

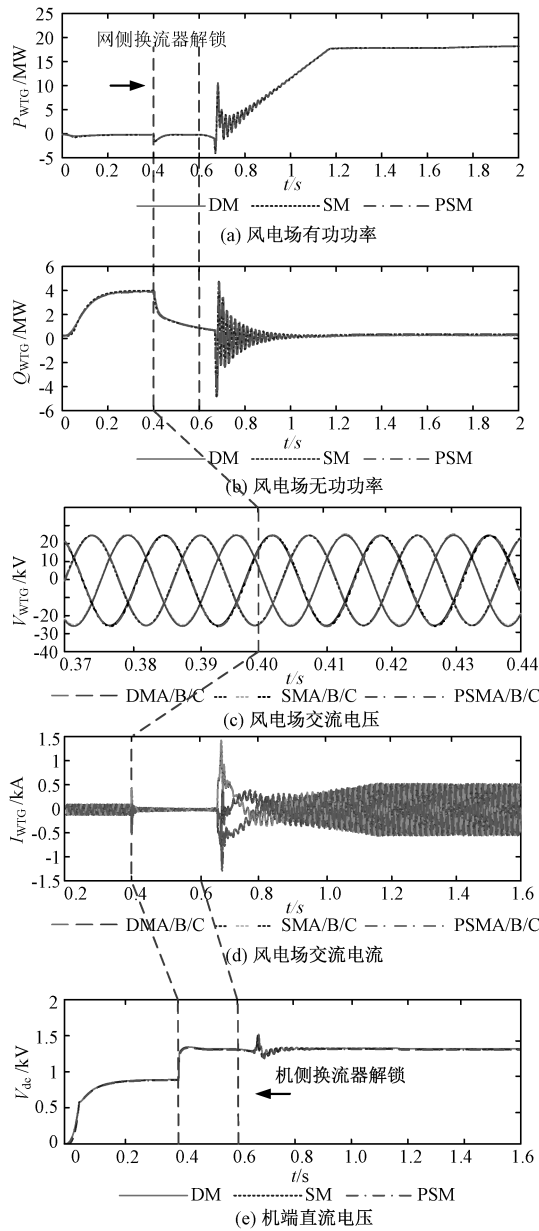


图 8 启动阶段各电气量仿真波形
Fig. 8 Simulated waveforms of electrical quantities at start-up stage

PSCAD/EMTDC 中搭建了由双馈风力发电单元个数分别为 9、15、30 组成的详细模型、分割模型和并行分割模型来验证所提方法的提速效果。仿真步长为 5 μs,仿真时长为 3 s。测试计算机配置为 Windows 11 操作系统,处理器型号为 AMD R7 4800U,8 核心,16 线程,主频为 1.80 GHz。表 2 记录了三类模型的 CPU 计算用时。

为了更直观地展示 SM、PSM 两类模型的提速效果,图 11 给出了仿真耗时随机组个数变化的趋势图。

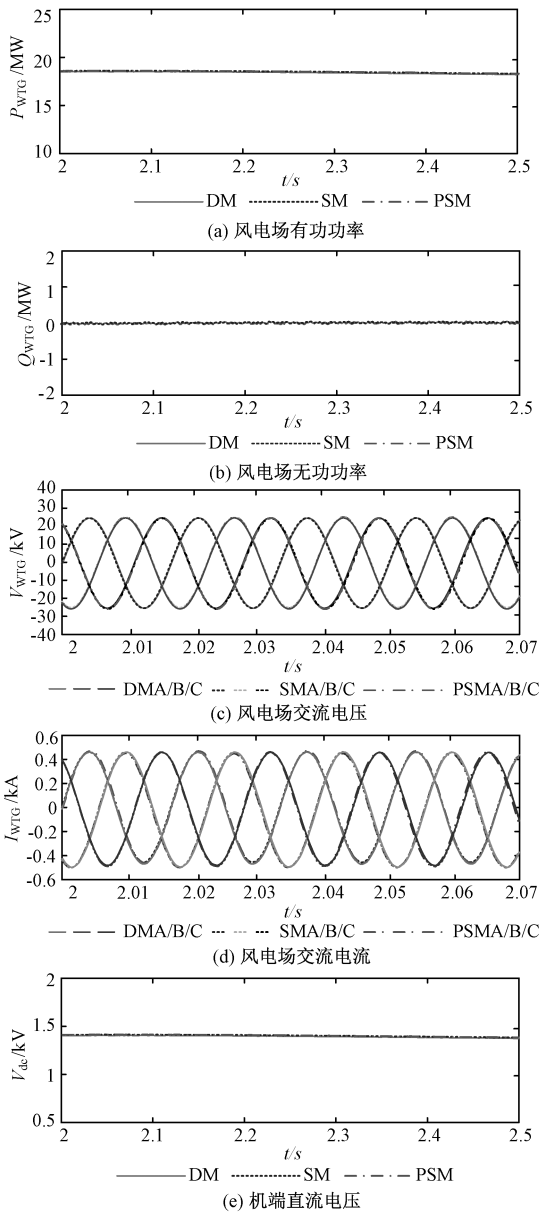


图 9 稳态阶段各电气量仿真波形

Fig. 9 Simulated waveforms of electrical quantities in steady state phase

表 2 DM 与 SM、PSM 的仿真用时比较						
Tab. 2 Comparison of simulation time of DM with SM and PSM						
机组 个数	仿真耗时/min			提速倍数		
	DM	SM	PSM	DM:SM	DM:PSM	
9	48.8	4.3	1.8	11.3	25.4	
15	303.2	6.3	3.1	48.1	97.8	
30	1 952.7	15.3	6.9	127.6	283.1	

图 11 表明,随着机组个数的增加,详细模型的仿真耗时成指数型增长,而两类提速模型 SM、PSM 成的仿真耗时成线性增长,因此提速效果也成指数性增长。当风机个数达到 30 h,两类提速

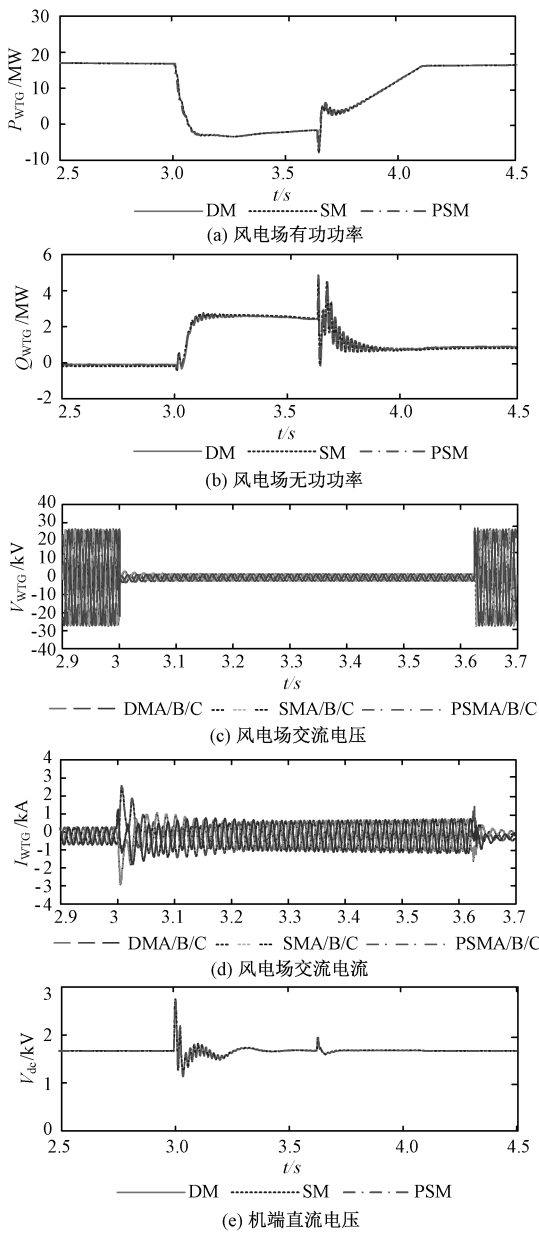


图 10 故障阶段各电气量仿真波形

Fig. 10 Simulated waveforms of electrical quantities during fault phase

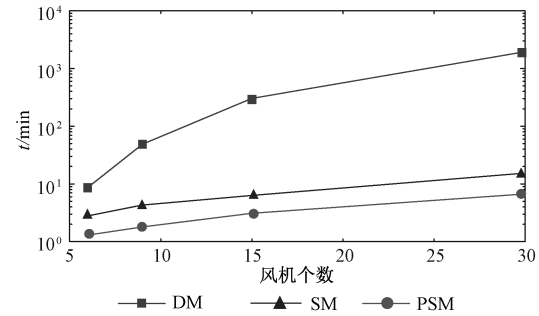


Fig. 11 Simulation time for three types of models

模型的计算效率比详细模型高出了两个数量级,大大提升了仿真效率。相比SM提速模型,PSM提速模型采用了多个计算单元,实现了计算任务的分布式处理,提速效果更为明显。

5 结 论

本文针对大规模风电场群电磁暂态仿真速度缓慢的实际问题,提出了一种基于单步时延受控源映射和长输电线路解耦方法结合的风电场群快速仿真方法。该方法不对风电场模型进行等值简化,而是通过节点受控源等效将风电系统分割为多个单元,实现风电场内机组间的并行计算,同时,利用长输电线路解耦特性实现风电场间的多线程运算。

所提出的快速仿真方法具有较高的准确性,能够反映风电系统在启动、换流器解闭锁、短路故障等工况下的行为。相比于使用详细模型,快速仿真模型的仿真效率提高了1~2个数量级,为实现大规模风电场电磁暂态仿真提供了可行的解决方案。

参考文献:

[1] 李建林,郭兆东,马速良,等. 新型电力系统下"源网荷储"架构与评估体系综述[J]. 高电压技术, 2022, 48 (11): 4330-4342.

LI Jianlin, GUO Zhaodong, MA Suliang, et al. Overview of the "source-grid-load-storage" architecture and evaluation system under the new power system [J]. High Voltage Technology, 2022, 48 (11): 4330-4342 (in Chinese).

[2] 徐玉琴,张林浩,王娜. 计及尾流效应的双馈机组风电场等值建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (1): 70-76.

XU Yuqin, ZHANG Linhao, WANG Na. Study on equivalent model of wind farms with DFIG considering wake effects [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42 (1): 70-76 (in Chinese).

[3] 古庭赞,杨骥嘉. 基于单机等值与选择模态分析的风电场等值建模方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48 (1): 102-111.

GU Tingyun, YANG Qijia. A wind farm equivalent modeling method based on single-machine equivalent modeling and selection modal analysis [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48 (1): 102-111 (in Chinese).

[4] 高峰,赵东来,周孝信,等. 直驱式风电机组风电

场动态等值[J]. 电网技术, 2012, 36 (12): 222-227.

GAO Feng, ZHAO Donglai, ZHOU Xiaoxin, et al. Dynamic equivalent algorithm for wind farm composed of direct-drive wind turbines [J]. Grid Technology, 2012, 36 (12): 222-227 (in Chinese).

- [5] ZOU M, WANG Y, ZHAO C, et al. Integrated equivalent model of permanent magnet synchronous generator based wind turbine for large-scale offshore wind farm simulation [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11 (5): 1415-1427.
- [6] ZOU M, XU J. Modeling for large-scale offshore wind farm using multi-thread parallel computing [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 148: 1-10.
- [7] 郭志,陈洁,黄净,等. 基于改进遗传KM聚类算法的风电场机群划分方法[J]. 可再生能源, 2016, 34 (2): 238-243.
- GUO Zhi, CHEN Jie, HUANG Jing, et al. Study on equivalent model of wind farms based on improved genetic K-means algorithm [J]. Renewable Energy, 2016, 34 (2): 238-243 (in Chinese).
- [8] 崔晓丹,吴家龙,王希,等. 适用于次同步振荡研究的直驱风电场等值建模[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38 (10): 148-157.
- CUI Xiaodan, WU Jialong, WANG Xi, et al. Equivalent modeling of direct drive wind farms for subsynchronous oscillation research [J]. Grid and Clean Energy, 2022, 38 (10): 148-157 (in Chinese).
- [9] 薛翼程,张哲任,徐政. 适用于短路故障分析的风电场动态等值建模方法[J]. 太阳能学报, 2022, 43 (5): 327-335.
- XUE Yicheng, ZHANG Zheren, XU Zheng. Dynamic equivalent model of wind farm for short-circuit faults analysis [J]. Journal of Solar Energy, 2022, 43 (5): 327-335 (in Chinese).
- [10] 王健,徐迦勒,冯昊. 基于LVRT期间无功功率特性的双馈风电场等效建模方法[J]. 电气应用, 2022, 41 (5): 1-10.
- WANG Jian, XU Jiale, FENG Hao. Equivalent modeling method for DFIG wind farms based on reactive power characteristics during LVRT [J]. Electrical Application, 2022, 41 (5): 1-10 (in Chinese).
- [11] 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. Feature analysis based equivalent modeling for large-scale wind farms [J]. Grid Technology, 2013, 37 (8): 2271-2277

- (in Chinese).
- [12] NVIDIA 联合微软发布行业标准级超大规模 GPU 加速器, 助推人工智能云计算发展 [J]. 智能制造, 2017, (3): 6.
NVIDIA and Microsoft release industry-standard-class hyperscale GPU accelerator, boosting the development of artificial intelligence cloud computing [J]. Intelligent Manufacturing, 2017, (3): 6 (in Chinese).
- [13] KATO T, KAORU I, YOSHIHIRO F. Method for multirate analysis of power electronic system by multidomain partitioning [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 131: 110-117.
- [14] LIN Ning, DINAVAH V. Variable time-stepping modular multilevel converter model for fast and parallel transient simulation of multiterminal DC grid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66 (9): 6661-6670.
- [15] 姚蜀军, 刘刚, 曾子文, 等. 直驱风力发电单元的电磁暂态半隐式延迟解耦与仿真方法 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (16): 6053-6063+6179.
YAO Shujun, LIU Gang, ZENG Ziwen, et al. Electromagnetic transient semi-implicit latency decoupling and simulation technology for direct-drive wind power generation unit [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2022, 42 (16): 6053-6063+6179 (in Chinese).
- [16] 薛巍, 舒继武, 严剑峰, 等. 基于集群机的大规模电力系统暂态过程并行仿真 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (8): 39-44.
XUE Wei, SHU Jiwu, YAN Jianfeng, et al. Cluster-based parallel simulation for power system transient stability analysis [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2003, 23 (8): 39-44 (in Chinese).
- [17] 李亚楼, 周孝信, 吴中习. 基于 PC 机群的电力系统机电暂态仿真并行算法 [J]. 电网技术, 2003, 27 (11): 6-12.
LI Yalou, ZHOU Xiaoxin, WU Zhongxi. Personal computer cluster-based parallel algorithms for power system electromechanical transient stability simulation [J]. Power Grid Technology, 2003, 27 (11): 6-12 (in Chinese).
- [18] 孙瑞娟, 梁军, 王克文, 等. 海上风电集电系统研究综述 [J]. 电力建设, 2021, 42 (6): 105-115.
SUN Ruijuan, LIANG Jun, WANG Kewen, et al. Overview of offshore wind power collection system [J]. Electric Power Construction, 2021, 42 (6): 105-115 (in Chinese).
- [19] 魏书荣, 符杨, 黄玲玲. 大型海上风电场中压集电系统拓扑结构的优化方法 [J]. 上海电力学院学报, 2015, 31 (3): 201-205+213.
WEI Shurong, FU Yang, HUANG Lingling. Topological optimization method of the electric power collection system for an offshore wind farm [J]. Journal of Shanghai Electric Power Institute, 2015, 31 (3): 201-205+213 (in Chinese).
- [20] 卢兴康. 浅析海上风电集电系统 [J]. 上海节能, 2019, (9): 749-752.
LU Xingkang. Study on offshore wind power collection system [J]. Shanghai Energy Conservation, 2019, (9): 749-752 (in Chinese).
- [21] SRIKAKULAPU R, VINATHA U. Optimized design of collector topology for offshore wind farm based on ant colony optimization with multiple travelling salesman problem [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6 (6): 1181-1192.
- [22] 刘平, 张媛, 莫堃, 等. 风力发电设备技术现状与发展趋势 [J]. 中国重型装备, 2022, (4): 1-6.
LIU Ping, ZHANG Yuan, MO Kun, et al. Current situation and development trend of wind power generation equipment technology [J]. China Heavy Equipment, 2022, (4): 1-6 (in Chinese).
- [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]. Power Construction, 2016, 37 (2): 10-17 (in Chinese).
- [24] 罗钢. 电力系统暂态实时仿真并行算法的研究进展 [J]. 广东电力, 2014, 27 (12): 62-69.
LUO Gang. Research development of parallel algorithm for power system transient real-time simulation [J]. Guangdong Power, 2014, 27 (12): 62-69 (in Chinese).

作者简介:

王焱 (1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为风电场群电磁暂态建模, E-mail: ncepuwy1998@163.com;
邹明 (1997), 男, 博士研究生, 研究方向为风电场电磁暂态建模及其仿真提速, E-mail: ZouMing@ncepu.edu.cn;
许建中 (1987), 男, 教授, 通信作者, 研究方向为新型电力系统电磁暂态建模与仿真, E-mail: xujianzhong@ncepu.edu.cn。