

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220674

# 基于等效短线路解耦法的风电场模型分割仿真研究

于飞, 董乐, 李梅航, 张倩, 刘喜梅

(青岛科技大学自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 为了加快大型风电场的仿真速率, 提出了一种基于等效短线路解耦的模型分割方案。首先对于机组类型单一的大型风电场, 采用输出倍乘与集电线路等值的方法进行简化建模。在此基础上, 针对风电场内线路较短, 难以采用长输电线路自然解耦来并行运算的缺点, 提出对等值后的机组连接线与连接升压站的长汇集线之间进行参数补偿, 从而满足输电线路在一个步长上的解耦判据。在 Matlab/Simulink 搭建仿真模型, 对模型分割前后进行了对比。仿真结果验证了所提方案的可行性。在此基础上采用状态空间节点(state space node, SSN)法对风电机组内部划分群组, 最终在 RT-LAB 平台上实现了大型海上风电场的实时化仿真。

**关键词:** 大型风电场; 等效短线路解耦; 模型分割; 状态空间节点法; RT-LAB; 实时仿真

## Model segmentation simulation of a wind farm based on an equivalent short-circuit decoupling method

YU Fei, DONG Le, LI Meihang, ZHANG Qian, LIU Ximei

(College of Automation & Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** To accelerate the simulation rate of large wind farms, a model segmentation scheme based on equivalent short line decoupling is proposed. First, for a large wind farm with a single unit type, the method of output multiplication and collector line equivalent is used to simplify the modeling. In view of the shortcomings of short lines in wind farms, it is difficult to use the natural decoupling of long transmission lines to operate in parallel. Thus parameter compensation is proposed between the unit connection line after equal value and the long collection line connected to the booster station, so as to meet the decoupling criterion of the transmission line in one step. A simulation model is built in Matlab/Simulink, the model before and after segmentation is compared, and the simulation results verify the feasibility of the proposed scheme. On this basis, the state space node (SSN) method is used to divide the wind turbine into internal groups, and finally real-time simulation of large-scale offshore wind farms is realized on the RT-LAB platform.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62103218).

**Key words:** large wind farms; equivalent short line decoupling; model segmentation; state space node method; RT-LAB; real-time simulation

## 0 引言

随着越来越多的风电场并入电网, 风电系统已成为电力系统中不可或缺的一部分, 风电场与电网之间的相互作用带来的系统稳定性问题<sup>[1-6]</sup>, 使得风电系统的仿真分析已成为电力系统当下的研究热点。实际风电场通常包含上百台风机, 如果对每台风机都进行详细建模, 必然会影响计算效率, 难以满足仿真分析的需求, 因此在保证仿真准确性的基

础上提高仿真速率变得尤为重要<sup>[7-8]</sup>。

目前等值建模是提高风电场仿真速率的主要途径, 主要包括单机等值与多机等值两种。因为实际风电场中机组的运行状态存在差异, 单机等值无法准确模拟风电场的运行特性, 因此基于分群原则的多机等值是日前风电场仿真的研究热点。文献[9]提出了一种基于尾流效应的分群依据, 定义了尾流影响因子来作为分群指标。文献[10]根据风电机组的运行方式与空间效应进行两次分群, 从而考虑到了风电场可能起到的调频作用。文献[11]考虑到机组控制方式不同带来的影响, 选用输入风速与转子电流受扰曲线两因素对风电场进行分群。针对故障期

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(62103218); 山东省自然科学基金项目资助(ZR2020MF081)

间的 LVRT 特性, 文献[12]根据暂态过程有功功率的响应来对风电场进行分群。风电场最佳的等值台数应考虑机组控制方式、风电场的空间效应以及暂态过程电压跌落水平和不同的故障类型等因素<sup>[13]</sup>, 尽管上述文献均通过分群降低了风场的复杂度, 但是采用单一指标分群仍存在精确度问题, 不具备普适性, 而细化指标界限或采用多个分群指标会增加群组数量, 从而降低了仿真效率。

并行仿真是近年来加速仿真甚至实现实时化仿真的一种有效手段, 而并行化的前提是通过合理的解耦方法将模型进行分割和降阶处理<sup>[14-16]</sup>。文献[17]与[18]采用传输线路解耦法来对交直流系统进行并行仿真, 并对网络划分问题进行了优化。文献[19-21]分别将状态空间节点法应用到双馈风力发电系统、模块化多电平换流器与交流配电网中, 通过划分群组大幅减少了仿真所需的存储空间与计算量。合理解耦是保证模型实时性与准确性的关键<sup>[22]</sup>, 但是目前对模型的分割研究大多集中在交直流系统中, 对于大型风电场的模型分割研究较少。

针对以上问题, 本文以大型风电场为研究对象, 提出在多机等值建模的基础上采用模型分割加速运算的仿真策略。首先对风电机组进行分群, 在此基础上采用等效短线路的解耦方法实现风电场的分割运算, 并以华东地区某海上风电场为参考搭建仿真模型, 通过引入 RT-LAB 实时仿真软件, 采用本文的模型分割方法来实现大型海上风电场的并行化实时仿真, 由此可以有效解决大型风电场规模太大导致的仿真困难问题, 提高仿真的效率与准确性。

## 1 风电场的等值建模

实际风电场中采用的风电机组类型较为单一, 因此本文采用单一机型为基本单元来构建风电场。

### 1.1 风机等值建模

当机组类型、参数以及运行状态相同时, 采用单机输出倍乘的建模方法不仅简单高效, 而且也有着较高的仿真精度<sup>[23-24]</sup>, 因此本文采用基于输出倍乘的单机模型来对风电场进行等效建模, 将每条馈线所连的风机等效为单台风机, 进而将整个风电场等值为多台风机。基于单机输出倍乘等值的建模原理为: 将单台风机的输出电流倍乘系数  $k$  后再反馈流入电网, 从而实现输入功率的等值放大, 原理如图 1 所示。

### 1.2 集电线路等值

风电场的连接方式有辐射式网络与链式网络两种, 且机组间的连接线长度相近, 因此对于机组之间的连接线作如下处理: 认为每台机组出力相同,

机端电压恒定, 采用近似功率损耗相等的方法, 将复杂的集电网络进行等效, 等值方式如图 2 所示。下文中将机组之间的连线称为连接线, 将汇集之后的输电线路称为汇集线。

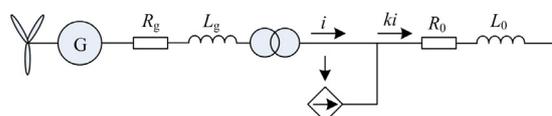


图 1 基于输出倍乘的单机等值模型

Fig. 1 A single-machine equivalent model based on output multiplication

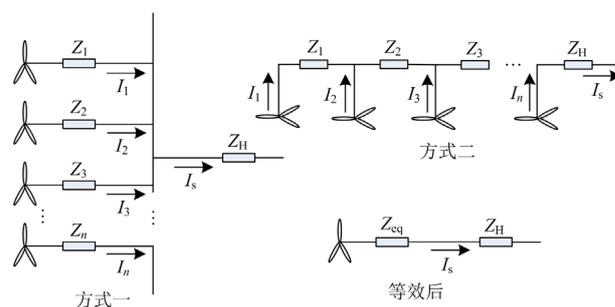


图 2 风电场线路等值

Fig. 2 Wind farm line equivalent

连接升压站的汇集线较长, 为避免过多引入误差, 单独进行考虑。以采用链式连接的机组为例, 等值阻抗计算如式(2)。

$$Z_{eq} = \frac{S_{z\_tol}}{n^2 I^2} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} i^2 Z_i}{n^2} \quad (1)$$

式中:  $Z_{eq}$  代表等值后的线路阻抗;  $S_{z\_tol}$  代表线路总损耗;  $I$  代表每个机组的输出电流;  $Z_i$  为第  $i$  台风机出口处的线路阻抗;  $n$  为等值前的风机台数。

考虑到风机出口处端电压相同, 线路对地导纳产生的损耗直接采用各部分对地导纳之和累加即可, 等值线路的对地导纳  $B_{eq}$  为

$$B_{eq} = \sum_{i=1}^{n-1} B_i \quad (2)$$

式中,  $B_i$  为第  $i$  台风机出口处线路对地导纳。最终风场连接线可等值为一段集中线路, 如图 3 所示。

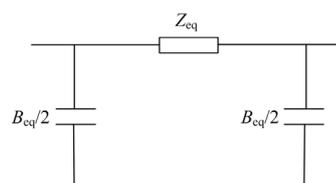


图 3 等值后的集中线路

Fig. 3 Concentrated line after equal value

## 2 模型分割算法

本文的仿真采用了两种模型分割算法：一种是基于传输线路解耦法的等效短线路解耦法；另一种是基于状态空间法与节点分析法的状态空间节点 (state space node, SSN)法<sup>[25]</sup>。前者主要用于实现含有一定距离线路的模型分割，后者主要用于实时化仿真多开关器件模型。

### 2.1 传输线路解耦法

传输线路解耦是依据 Bergeron 的行波法<sup>[26]</sup>来进行建模的，当电磁波在线路上的传输延时大于仿真步长时，线路两端的两个任务就可以被划分到两个子系统中来进行独立运算。

设线路单位长度的电感和电容分别为  $L$  和  $C$ ，那么线路特征阻抗  $Z_c$  与电磁波传输速度  $v$  分别为

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4)$$

对于一条长度为  $l$  的输电线路，则电磁波在线路上的传播时间  $\tau = l/v$ 。基于 Bergeron 法对单相无损分布参数线路进行求解，可得线路两端的特征方程为

$$i_k(t) = \frac{1}{Z_c} u_k(t) + I_{k,his} \quad (5)$$

$$I_{k,his} = -i_m(t - \tau) - \frac{1}{Z_c} u_m(t - \tau) \quad (6)$$

$$i_m(t) = \frac{1}{Z_c} u_m(t) + I_{m,his} \quad (7)$$

$$I_{m,his} = -i_k(t - \tau) - \frac{1}{Z_c} u_k(t - \tau) \quad (8)$$

式中： $i_k(t)$ 、 $i_m(t)$  分别为  $t$  时刻线路 k、m 端的电流； $u_k(t)$ 、 $u_m(t)$  分别为  $t$  时刻 k、m 端的电压； $I_{k,his}$ 、 $I_{m,his}$  分别为  $t$  时刻 k、m 端的历史电流源。

图 4 所示为单相无损分布式线路的两端口等效模型，端口之间没有电气联系，两端的模型仅通过交换对端的历史数据便可以实现独立运算。

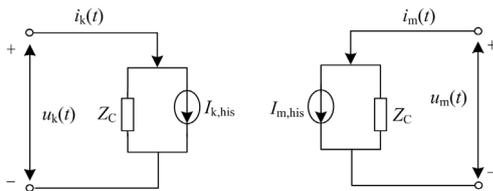


图 4 单相分布参数线路两端口模型

Fig. 4 Two-port model of single-phase distributed parameter line

### 2.2 等效短线路解耦法

针对长距离的特高压、超高压直流输电工程，采用长输电线路解耦进行模型分割容易实现，但是当系统中出现长输电线路占比较低的情况时，如大型配电系统、新能源集群汇集处，在这些情况下模型由于线路长度的限制不能利用传输延时自然解耦，从而限制了这种方法的使用。

从第 1 节可知，风电场内部的机组连接线可以等效为一段短线路，将短线路与送入升压站的汇集线来综合考虑，用短线路补偿汇集线路的参数，使其达到一个步长下的解耦判据，如图 5 所示。其中下标 L 代表短线路参数，下标 H 代表长线路参数。

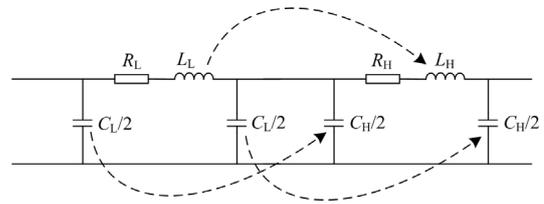


图 5 线路参数补偿

Fig. 5 Line parameter compensation

假设汇集线的正序与零序参数分别为  $R_1$ 、 $L_1$ 、 $C_1$  和  $R_0$ 、 $L_0$ 、 $C_0$ ，仿真步长为  $T_s$ ，未补偿前行波传输时长为  $t_1$ ，补偿后行波传输时长为  $t_2$ ，假设原来的线路参数不满足线路解耦的特性，以补偿电容<sup>[27]</sup>为例，推导过程如式(9)一式(11)所示。

$$t_1 = \frac{l}{1/\sqrt{L_1 C_1}} < T_s \quad (9)$$

$$\begin{cases} C'_1 = C_1 + C_c \\ C'_0 = C_0 + C_c \end{cases} \quad (10)$$

$$t_2 = \frac{l}{1/\sqrt{L_1 C'_1}} \geq T_s \quad (11)$$

式中： $C_c$  为补偿电容； $C'_1$ 、 $C'_0$  分别为补偿后的正序与零序电容。采用参数补偿使线路满足一个步长下的解耦判据，以此作为模型分割元件可以减小引入延时或改变参数带来的仿真误差。

### 2.3 状态空间节点法

SSN 算法的原理是将系统划分为多个状态空间群组，每个群组采用状态空间法进行建模与求解，得到各个群组的戴维南(诺顿)等效电路，在此基础上采用节点分析法求解整体系统的节点网络方程，得到系统的解。对于一个状态空间方程

$$\begin{cases} \dot{x} = A_k x + B_k u \\ y = C_k x + D_k u \end{cases} \quad (12)$$

式中： $x$ 、 $u$  分别为群组的的状态变量和输入变量； $y$

为输出变量;  $A_k$ 、 $B_k$ 、 $C_k$ 、 $D_k$  代表开关等非线性设备的第  $k$  次状态对应的状态矩阵。

将式(12)进行离散化可得

$$\begin{cases} x_{t+\Delta t} = \tilde{A}_k x_t + \tilde{B}_k u_t + \tilde{B}_k u_{t+\Delta t} \\ y_{t+\Delta t} = C_k x_{t+\Delta t} + D_k u_{t+\Delta t} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\Delta t$  为仿真步长;  $\tilde{A}_k$ 、 $\tilde{B}_k$  为离散过程中生成的系数矩阵;  $u_t$  为当前时刻的输入变量;  $u_{t+\Delta t}$  为下一时刻的输入变量;  $x_t$  为当前时刻的状态变量;  $x_{t+\Delta t}$  为下一时刻的状态变量。

式(13)在进一步细化与合并后得到

$$y_{t+\Delta t} = C_k (\tilde{A}_k x_t + \tilde{B}_k u_t) + (C_k \tilde{B}_k + D_k) u_{t+\Delta t} \quad (14)$$

在求解  $y_{t+\Delta t}$  之前, 式中存在上一时刻的已知量与当前时刻的未知量, 式(14)可进一步表示为

$$y_{t+\Delta t} = y_{k_{\text{his}}} + W_k u_{t+\Delta t} \quad (15)$$

式中:  $y_{k_{\text{his}}}$  为上一时刻的已知量;  $W_k$  可以表示为

$$W_k = C_k \tilde{B}_k + D_k \quad (16)$$

SSN 算法不同于绝大部分模型分割算法, 它通过解算器来将模型划分为多个状态空间群组, 不引入人为延时也不改变模型参数, 从而避免了分割模型导致的仿真精度与数值稳定性问题。

### 3 仿真验证

为了验证本文所提出的基于参数补偿的等效短线路解耦法对大规模风电场分割的有效性, 首先对含有 30 台风机的风电场进行了算例分析, 并与传统的解耦方法进行了对比; 之后采用 RT-LAB 实时仿真平台, 基于等效短线路解耦法与 SSN 算法对大型海上风电场进行实时化仿真。

#### 3.1 算例分析

搭建了如图 6 所示的风电场并网模型, 风电场由 30 台型号相同的永磁式直驱风机构成, 单台风机额定功率为 4 MW, 风机包含独立的功率控制与故障穿越功能, 详细参数如表 1 所示。每台风机机端电压为 690 V, 经箱式变压器与交流海缆汇集后与 35 kV 中压母线相连, 之后经 35 kV/230 kV 升压变升压后与 230 kV 电网相连。

仿真软件采用 Matlab 平台, 仿真步长设为 50  $\mu\text{s}$ , 解算器选用 ord5。采用单机倍乘与集线等值的方法将风电场等值为 6 台等值风机模型, 图 7 中省略了箱式变压器, 每个机组等效 5 台风机, 风机输入转速为额定转速, 其中下标 L 代表机组连接线等值后的短线路, 下标 H 代表长汇集线线路。

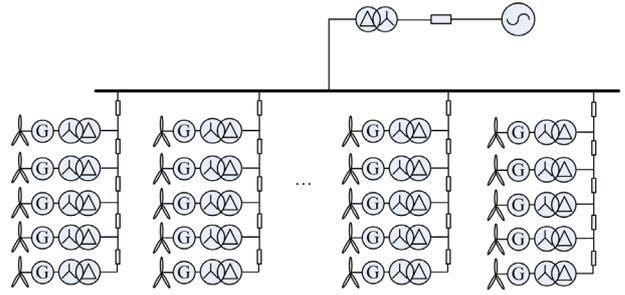


图 6 风电场并网模型

Fig. 6 Wind farm grid-connected model

表 1 4 MW 直驱风电机组主要参数

Table 1 Main parameters of 4 MW direct-driven wind turbine

参数	对应值	参数	对应值
定子电阻/ $\Omega$	0.0084	直流电容/F	0.04
d 轴电感/H	0.000 14	滤波电容/F	$1 \times 10^{-6}$
q 轴电感/H	0.000 15	预充电电阻/ $\Omega$	1
磁链系数/(V·s)	1.5439	变压器变比/(V/kV)	690/35
额定转速/rpm	1200	变压器容量/MVA	4.4
电机极对数	3	升压变容量/MVA	140

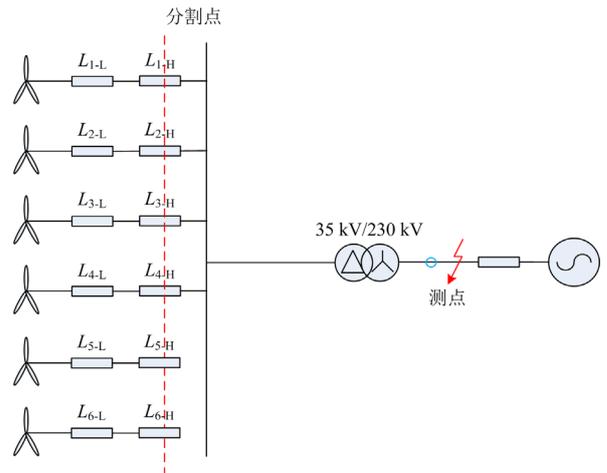


图 7 仿真拓扑图

Fig. 7 Simulation topology

以某一长度为 4.5 km 的汇集线为例, 其线路参数如表 2 所示, 将其作为解耦元件。从表 2 中可以看出, 在此线路上行波传输延时为 43.54  $\mu\text{s}$ , 小于一个仿真步长。

表 2 补偿前的交流线路参数

Table 2 AC line parameters before compensation

相序	$R/(\Omega/\text{km})$	$L/(\text{H}/\text{km})$	$C/(\mu\text{F}/\text{km})$	传输延时/ $\mu\text{s}$
正序	0.0614	0.0004	0.234	43.54
零序	0.1842	0.0011	0.234	

机组连接线的等值线路长度为 1 km, 参数如表 3 所示, 用其对汇集线进行参数补偿, 补偿后的线路参数如表 4 所示, 此时, 线路传输延时大于 50  $\mu$ s, 因此可以将线路两端的任务分离开独立运算。

表 3 机组等值线路参数

Table 3 Unit equivalent line parameters

相序	R/( $\Omega$ /km)	L/(H/km)	C/( $\mu$ F/km)
正序	0.342	0.0005	0.134
零序	1.026	0.0014	0.134

表 4 补偿后的交流线路参数

Table 4 AC line parameters after compensation

相序	R/( $\Omega$ /km)	L/(H/km)	C/( $\mu$ F/km)	传输延时/ $\mu$ s
正序	0.141	0.000 46	0.238	51.72
零序	0.4227	0.001 34	0.238	

采用上述补偿方法对汇集线进行参数补偿, 使补偿后的线路尽可能满足单位步长的传输线路解耦判据, 在此基础上进行算例验证。为了验证本文方法的有效性, 选取采用改变线路电感的传统解耦方法进行对比, 对比工况如下: 网侧发生三相短路故障, 持续时间 0.15 s; 网侧电压跌落至 0.2 p.u., 持续时间 0.625 s; 网侧电压跌落至 0.5 p.u., 持续时间 1.024 s。在 3 个测试工况中, 风机均运行在额定功率下, 系统功率 120 MW 满发,  $t = 4$  s 时, 网侧发生三相接地故障, 150 ms 后故障消失, 网侧的电压、电流以及功率波形分别如图 8、图 9 所示。

从图 9 中可以看出: 传统的解耦方法改变了线路电感, 因此引入了仿真偏差, 其中暂态过程偏差

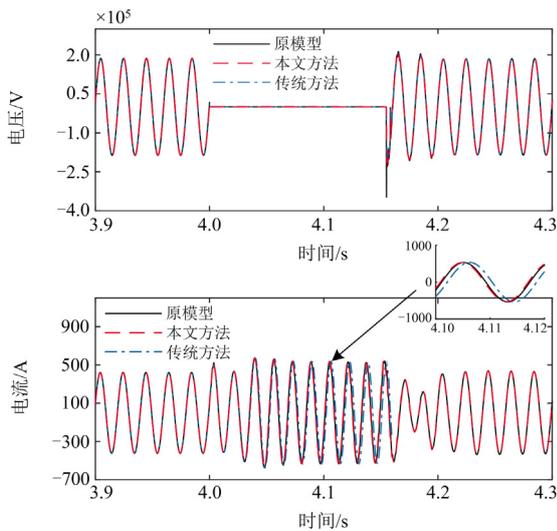


图 8 故障时网侧电压和电流波形

Fig. 8 Grid-side voltage and current waveforms at fault

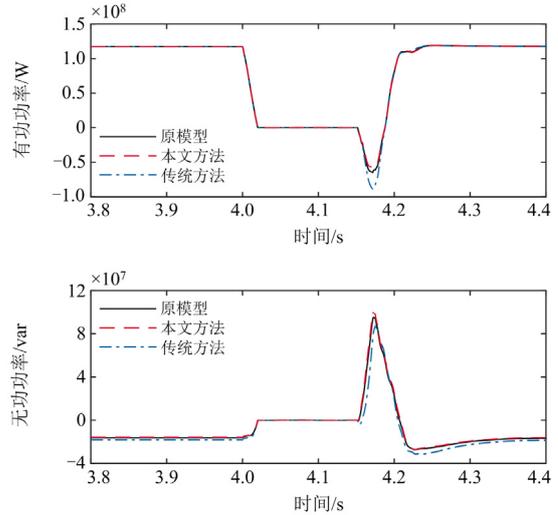


图 9 故障时网侧功率波形

Fig. 9 Grid-side power waveform at fault

更大, 因为风电场功率因数接近 1, 所以改变参数导致的电流偏差主要体现在无功功率上; 而采用参数补偿的等效短线路解耦法因为不改变模型整体参数, 所以相较于传统方法在暂态过程有着更小的仿真偏差。图 10 和图 11 为网侧电压发生不同程度跌落时的功率波形。

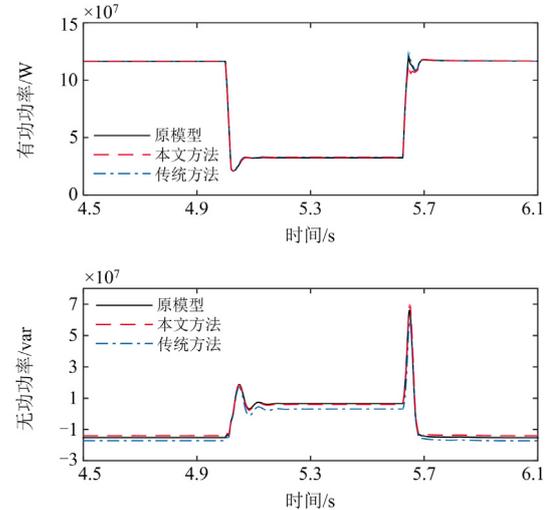
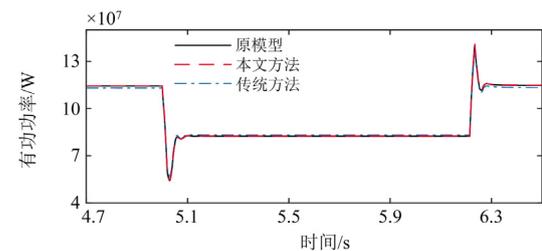


图 10 网侧电压跌落至 0.2 p.u.时功率波形

Fig. 10 Power waveform when grid side voltage drops to 0.2 p.u.



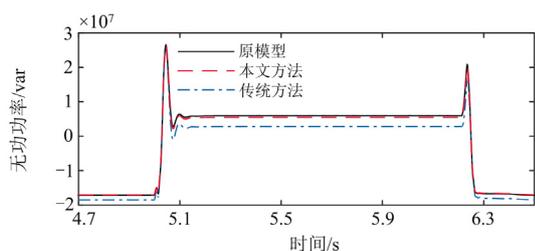


图 11 网侧电压跌落至 0.5 p.u. 时功率波形

Fig. 11 Power waveform when grid side voltage drops to 0.5 p.u.

从图 9—图 11 可以看出, 本文采用的模型分割方法在不同工况下, 测点处的功率与原模型吻合度较高; 与传统方法相比, 采用参数补偿的解耦方法在稳态以及暂态过程的响应更加准确, 验证了本文所提方法的有效性。

需要注意的是, 在离线仿真中, 等值后的风场 (6 机) 模型运行 1 s 实际需要时间约 50 s, 耗时严重, 不利于模型的修改与仿真分析。

### 3.2 实时仿真验证

实时仿真平台采用 OPAL-RT 公司推出的 OP5700 实时仿真机, 包含 32 核的 Intel 3.0 GHz 处理器、一块 Virtex-7FPGA 板卡, 运行 REDHAT Linux 系统。平台搭载的 RT-LAB 实时仿真软件, 能够很好地与 Simulink、Sim Power System 等工具兼容, 平台自带的 ARTEMIS 工具箱以及各种解耦模块有利于实现复杂模型的实时化仿真。硬件平台架构如图 12 所示, 由上位机与实时仿真机组成, 两者以 TCP/IP 通信方式相连。

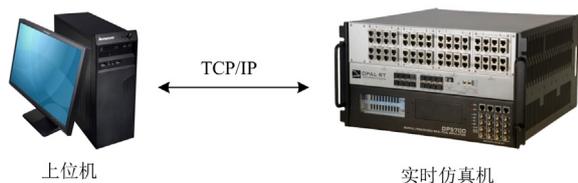


图 12 硬件平台架构

Fig. 12 Hardware platform architecture

RT-LAB 采用 v11.3.6 版本, ARTEMIS 采用 v7.3.6.38 版本 (包含状态空间节点解算器), 仿真步长设置为 50  $\mu$ s, 基于 RT-LAB 仿真软件的计算流程如图 13 所示。

以华东地区某海上风电项目为参考, 对其 400 MW 功率的海上风电场进行仿真, 采用的风机与离线仿真采用的风机类型、参数均相同, 风场拓扑如图 14 所示。

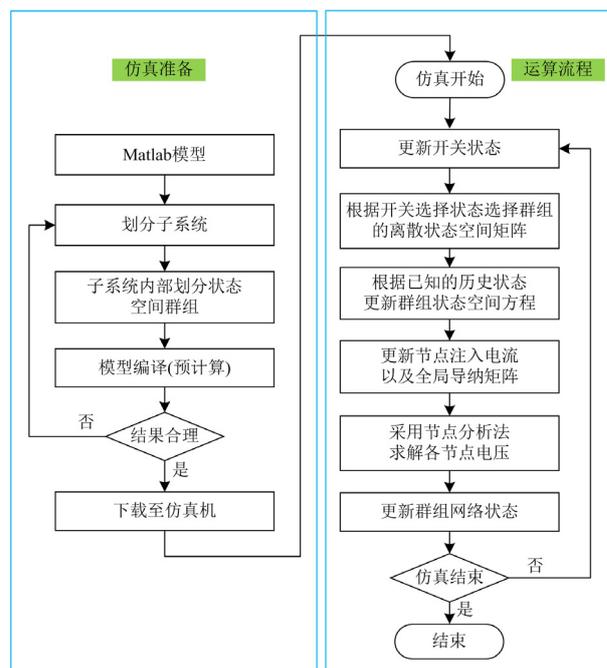


图 13 RT-LAB 仿真流程图

Fig. 13 RT-LAB simulation flow chart

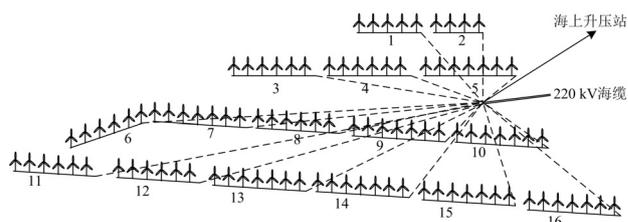


图 14 风电场拓扑

Fig. 14 Wind farm topology

考虑到硬件资源的限制, 将每条馈线所连的风机等值为单台风电机组, 采用单个 CPU 内核仿真两个风电机组, 升压站部分在一个内核中仿真, 主核因为需要负责各个内核之间的通信部分, 需要额外的资源占用, 考虑到升压站部分模型资源占用较少, 因此用来作为主核, 模型分割方案如图 15 所示, 解耦元件的参数为补偿后的汇集线参数。

风机内部采用 SSN 模块对矩阵进行降阶, 解耦点如图 16 中的红色模块所示, 解耦后的风机模型被分为了两个状态空间群组, 由此可以大大降低风机模型的矩阵维度, 减少预计算所需的存储量与实时计算量。

$t = 4$  s 时, 220 kV 源侧发生三相接地故障, 故障持续 150 ms, 测点分别为变压器源侧、风机所连馈线 1 的出口侧, 如图 15 所示。图 17、图 18 分别为实时仿真状态下测点 1、2 的电压电流与功率波形。

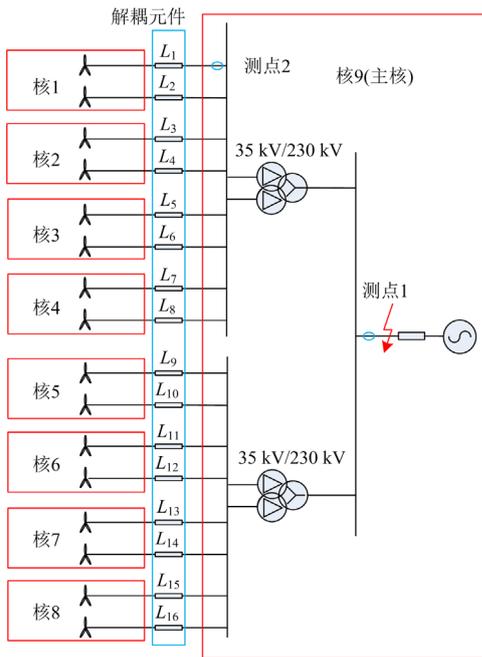


图 15 模型分割方案

Fig. 15 Model splitting strategy

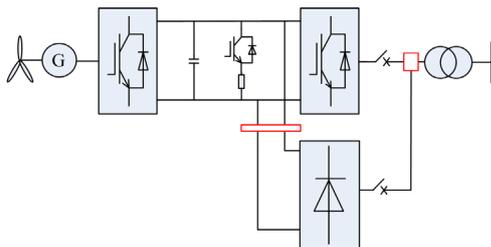


图 16 风机内部解耦

Fig. 16 Decoupling inside the fan

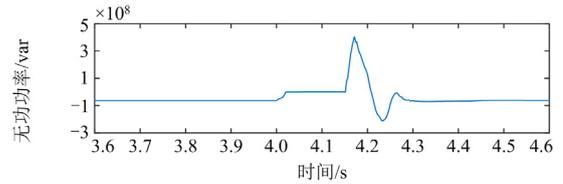
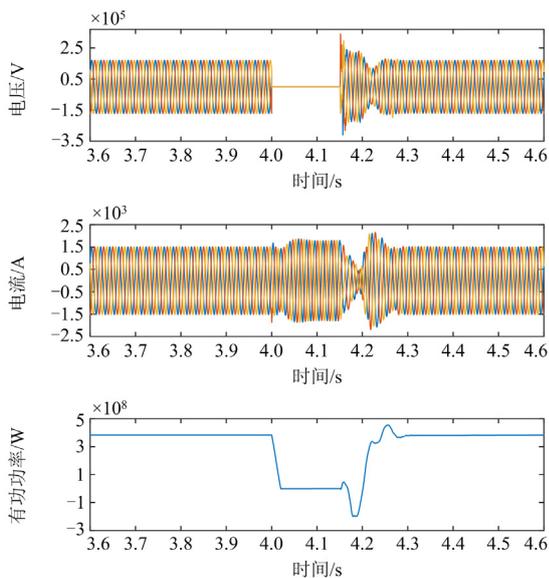


图 17 故障时测点 1 处电压电流与功率波形

Fig. 17 Voltage, current and power waveforms at measuring point 1 when fault occurs

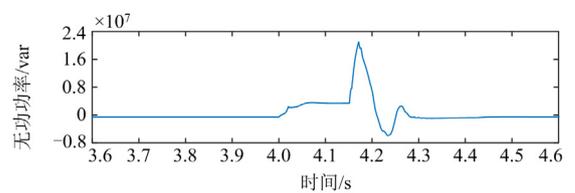
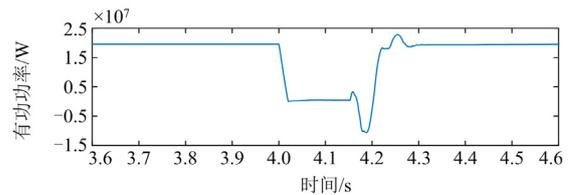
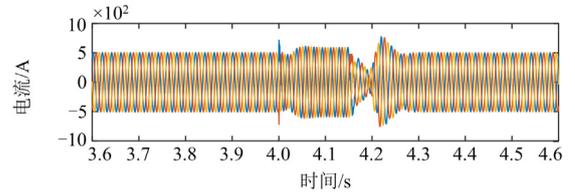
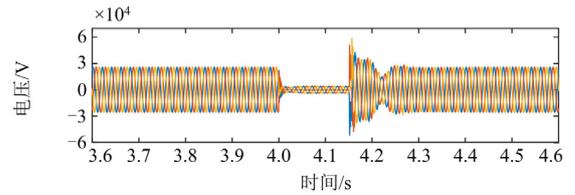


图 18 故障时测点 2 处电压电流与功率波形

Fig. 18 Voltage, current and power waveforms at measuring point 2 when fault occurs

从图 17、图 18 可以看出，风机稳定运行时，风场所发功率为 400 MW，馈线 1 出口侧有功功率为 20 MW，无功功率在 0 值附近。当变压器源侧发生故障时，测点 1 电压降至 0 附近，有功功率也随之迅速跌落至 0；测点 2 电压迅速跌落，但因为与故障点之间存在一定的阻抗，电压不会跌落为 0，此时挂在 35 kV 母线上的风机进入低电压穿越阶段，发出无功用以抬升电压，150 ms 后故障切除，随着电压的恢复，风场的功率迅速恢复至故障前水平。实时仿真下的波形在走势以及暂态响应方面与理论分析较为一致，验证了本文提出的分割方案的

有效性。

#### 4 结论

本文针对大型风电场系统的模型分割进行了仿真研究,采用了基于等效短线路解耦法的模型分割方案,并应用到大型海上风电场的实时化仿真中,得到的主要结论如下:

1) 采用参数补偿的等效短线路解耦模型分割方案,在不改变系统整体参数的情况下能对大型风电场进行有效的模型分割,仿真结果表明分割后的模型能保证较高的仿真精度。

2) 模型分割搭配并行仿真技术可以有效地提高大型风电场仿真速度,在此基础上提高建模的精确性(采用多要素分群、细化分群指标等),可以更加有效地对大型风电场进行仿真分析。

3) 本文应用的模型分割策略具有较好的扩展性,当应用在其他系统中,线路与相连的电容器组、变压器漏感等元件均可以通过参数补偿的方式来实现特定步长的延时解耦。

本文的研究侧重点为模型的分割,旨在保证分割前后模型的准确性,因此对风电场的建模进行了简化处理,为已投运风电场的仿真研究与实时调度提供了一种新思路:可以在提高建模精确性的基础上与模型分割并行算法相结合,从而提高大型风电场建模的准确性与仿真速度。

#### 参考文献

- [1] 李光辉,王伟胜,张兴,等. 双馈风电场并网次/超同步振荡建模与机理分析(一):考虑功率外环的阻抗建模[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2438-2449.  
LI Guanghui, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Modeling and suppression method of sub/super-synchronous oscillation of grid-connected DFIG wind farms (part I): sequence impedance modeling and analysis of DFIG wind turbines considering power loop[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2438-2449.
- [2] 李亦伦. 一起风电场高频振荡事故的原因和解决方法分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 135-142.  
LI Yilun. Analysis of causes and solutions of a high-frequency oscillation accident in a wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 135-142.
- [3] 徐衍会,耿雨柔,杨博文. 风电场引发火电机组次同步振荡的机理及影响因素研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 1-9.  
XU Yanhui, GENG Yurou, YANG Bowen. Study on the mechanism and influencing factors of subsynchronous oscillations induced by wind farms in a fossil fuel power plant[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 1-9.
- [4] 马宁宁,谢小荣,贺静波,等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-4732.  
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4732.
- [5] 徐政. 高比例非同步机电源电网面临的三大技术挑战[J]. 南方电网技术, 2020, 14(2): 1-9.  
XU Zheng. Three technical challenges faced by power grids with high proportion of non-synchronous machine sources[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(2): 1-9.
- [6] CHI Y, TANG B, HU J, et al. Overview of mechanism and mitigation measures on multi-frequency oscillation caused by large-scale integration of wind power[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(4): 433-443.
- [7] FARUQUE M D O, STRASSER T, LAUSS G, et al. Real-time simulation technologies for power systems design, testing, and analysis[J]. IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, 2015, 2(2): 63-73.
- [8] GUILLAUD X, FARUQUE M O, TENINGE A, et al. Applications of real-time simulation technologies in power and energy systems[J]. IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, 2015, 2(3): 103-115.
- [9] 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.
- [10] 白雁翔,王德林,马宁宁,等. 大型风电场的动态等值方法研究[J]. 电工技术, 2018(13): 46-49, 52.  
BAI Yanxiang, WANG Delin, MA Ningning, et al. Study on dynamic equivalence method of large scale wind farm[J]. Electric Engineering, 2018(13): 46-49, 52.
- [11] 徐玉琴,刘丹丹. 基于两步分群法的双馈机组风电场等值建模[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 108-114.  
XU Yuqin, LIU Dandan. Equivalence of wind farms with DFIG based on two-step clustering method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 108-114.
- [12] 齐金玲,李卫星,晁璞璞,等. 直驱风电场实用化等值方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 50-57.  
QI Jinling, LI Weixing, CHAO Pupu, et al. Practical equivalent method for direct-driven wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 50-57.

- [13] 侯俊贤, 陶向宇, 张静, 等. 基于低电压穿越控制策略的风电场等值方法[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1281-1286.  
HOU Junxian, TAO Xiangyu, ZHANG Jing, et al. A low-voltage ride-through control strategy based equivalence method for wind farms[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1281-1286.
- [14] CHENG T, DUAN T, DINAHAHI V. Parallel-in-time object-oriented electromagnetic transient simulation of power systems[J]. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2020, 7: 296-306.
- [15] 韩佶, 董毅峰, 苗世洪, 等. 基于 MATE 的电力系统分网多速率电磁暂态并行仿真方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1857-1865.  
HAN Ji, DONG Yifeng, MIAO Shihong, et al. Multi-rate electromagnetic transient parallel simulation of power system based on MATE[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1857-1865.
- [16] 刘飞. 电力系统仿真模型分割及接口算法研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2019.
- [17] 李高望, 陈锐智, 陈艳波. 考虑网络划分优化的交直流系统并行电磁暂态仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 72-80.  
LI Gaowang, CHEN Ruizhi, CHEN Yanbo. Research on parallel electromagnetic transient simulation of an AC-DC system considering optimization of network division[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 72-80.
- [18] 王薇薇, 朱艺颖, 刘翀, 等. 基于 HYPERSIM 的大规模电网电磁暂态实时仿真实现技术[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1138-1143.  
WANG Weiwei, ZHU Yiyong, LIU Chong, et al. Realization of electromagnetic real-time simulation of large-scale grid based on HYPERSIM[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1138-1143.
- [19] 王伟华, 朱晋, 李炜, 等. 基于 SSN 解算器的 MMC-HVDC 系统 RT-LAB 实时仿真[J]. 南方电网技术, 2015, 9(6): 22-27.  
WANG Weihua, ZHU Jin, LI Wei, et al. SSN-based RT-LAB simulation of MMC-HVDC system[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(6): 22-27.
- [20] 谭伟, 邱华静, 邹毅军. SSN 算法在大型风电系统实时仿真中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 98-103.  
TAN Wei, QIU Huajing, ZOU Yijun. Application of SSN algorithm in large wind power system real-time simulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 98-103.
- [21] HOOSHYAR H, VANFRETTI L, DUFOUR C. Delay-free parallelization for real-time simulation of a large active distribution grid model[C] // IECON 2016- 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 23-26, 2016, Florence, Italy: 6278-6284.
- [22] 朱艺颖, 于钊, 李柏青, 等. 大规模交直流电网电磁暂态数模混合仿真平台构建及验证 (一) 整体构架及大规模交直流电网仿真验证[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 164-170.  
ZHU Yiyong, YU Zhao, LI Baiqing, et al. Construction and validation of electromagnetic transient digital-analog hybrid simulation platform for large-scale AC/DC power grids part one general configuration and simulation validation of large scale AC/DC Power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 164-170.
- [23] 赵艳军, 曾沅. 基于双馈式风电机组的风电场实用动态等值模型研究[J]. 广东电力, 2012, 25(4): 53-58, 64.  
ZHAO Yanjun, ZENG Yuan. Research on applied dynamic equivalence model for wind farm based on double-fed wind power generating units[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(4): 53-58, 64.
- [24] KILANI K B, ELLEUCH M. Simplified modelling of wind farms for voltage dip transients[C] // International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices, March 20-23, 2012, Chemnitz, Germany: 1-6.
- [25] DUFOUR C, MAHSEREDJIAN J, BELANGER J. A combined state-space nodal method for the simulation of power system transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 26(2): 928-935.
- [26] DOMMEL H W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(4): 388-399.
- [27] 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, 193.  
HU Tao, ZHU Yiyong, 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, 193.

收稿日期: 2022-05-08; 修回日期: 2023-03-27

作者简介:

于飞(1961—), 男, 博士, 硕士生导师, 研究方向为高压直流输电、新能源并网; E-mail: yyffqd@163.com

董乐(1997—), 男, 硕士, 研究方向为新能源并网; E-mail: canyuedong@qq.com

刘喜梅(1961—), 女, 通信作者, 博士, 博士生导师, 研究方向为电力电子、智能控制。E-mail: liuximeiqd@163.com

(编辑 魏小丽)