

基于多 Agent 系统的大型电网电压暂降评估

黄佳铭¹, 张逸¹, 陈晶腾², 高漩², 贾荣¹, 吴逸帆¹

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 国网莆田供电公司, 福建 莆田 351100)

摘要: 面向实际大型电网的暂降评估需要考虑覆盖全网特征的线路故障仿真, 其仿真计算速度和稳定性是制约其实用化的主要因素。为此提出了一种基于多 Agent 系统的大型电网电压暂降评估方法。该方法根据仿真需求构造多 Agent 系统并制定协同交互规则。首先, 由网架解析和故障设置 Agent 自主生成仿真任务。其次, 由仿真管理和计算 Agent 动态执行海量仿真。最后, 由数据处理和分析 Agent 异步存储仿真数据并生成评估结果。目前该方法已应用在某省级电网电压暂降评估工作中, 取得了较好效果。实例证明所提方法加速比高, 运行稳定, 可为大型电网电压暂降评估实用化提供技术支撑。

关键词: 大型电网; 多 Agent 系统; 电压暂降评估; 协同规则

Voltage sag assessment of a large power grid based on a multi-Agent system

HUANG Jiaming¹, ZHANG Yi¹, CHEN Jingteng², GAO Xuan², JIA Rong¹, WU Yifan¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. State Grid Putian Electric Power Company, Putian 351100, China)

Abstract: Line fault simulation which covers the whole network should be considered in actual large-scale power grid sag assessment. The calculation speed and stability of the simulation are the main factors that restrict its practicability. Therefore, this paper proposes a voltage sag assessment method for a large-scale power grid based on a multi-Agent system. This method constructs the multi-Agent system and formulates collaborative interaction rules according to simulation requirements. First, the simulation task is generated independently by the grid analysis and a fault setting Agent. Second, massive simulation is dynamically executed by simulation management and a computational Agent. Finally, the simulation data are stored asynchronously by the Agent and the evaluation results are generated. At present, this method has been applied to the voltage sag assessment of a provincial power grid, and good results have been achieved. Examples show that this method has high acceleration ratio and stable operation, and can provide technical support for the practical application of voltage sag assessment of a large power grid.

This work is supported by the Science and Technology Guidance Project of Fujian Province (No. 2020H0009).

Key words: large scale power grid; multi-Agent system; voltage sag assessment; collaborative rules

0 引言

目前电压暂降已经成为电网主要电能质量问题之一, 每年因电压暂降造成的经济损失巨大^[1-3]。电力公司普遍利用安装电能质量监测终端的方法, 分析监测数据以评估暂降风险指标、指导暂降治理和线路运维^[4-6]。但实际电网中, 电能质量监测终端在全网部署占比较少, 监测数据无法覆盖全网暂降特征。仅用监测数据难以全面有效地评估全网电

压暂降严重程度^[7-9]。通过暂降成因分析, 由线路短路故障引起的电压暂降频次最高, 影响范围最广, 是造成暂降的主要原因, 因此研究电网短路故障后的残压幅值是评估电网电压暂降严重程度的重要方法^[10-11]。在监测数据不足的情况下, 通过设置线路短路故障、仿真电网电压暂降来为评估治理提供依据, 这是目前电压暂降评估治理的主要手段^[12-13]。

在建立实际电网网架模型时, 考虑模型准确性和更新及时性, 普遍采用由电力公司调度部门维护的 BPA 网架模型并使用 BPA 软件作为电压暂降仿真工具^[14-16]。目前基于 BPA 的电压暂降仿真方法主

要采用串行仿真方法^[17-19]，即全网潮流计算、线路故障仿真、读取暂降结果。在面向小网络的随机线路故障仿真时，仿真效率可满足需求；但面向大型电网时，仿真效率随电网规模的增大而快速下降。当执行万单位级以上数量的仿真任务时，仿真总时长将达到数十小时，无法满足日前计划安排或电网运行方式改变后快速评估等工程应用的需求。同时，串行仿真方法可靠性较差，当故障仿真意外终止时，将造成该次仿真结果缺失，为保证仿真任务的完整性，需要重新进行全网仿真。

针对以上问题，本文提出一种基于多 Agent 系统的大型电网电压暂降评估方法。该方法将暂降评估所需环节视为各个 Agent 并构造多 Agent 系统，通过各 Agent 信息交互对计算资源进行优化分配，实现全网批量线路故障仿真并计算评估结果。首先，网架解析 Agent 解析网架数据并确定待仿真线路与待监视母线；其次，仿真管理 Agent 根据任务和资源动态分配，仿真计算 Agent 自主执行仿真；最后，数据处理 Agent 异步存储仿真结果，数据分析 Agent 生成电压暂降严重程度评估结果。目前，本文方法已经成功应用于某省电网电压暂降评估工作中。

1 暂降评估流程与多 Agent 系统设计思路

1.1 现存问题

现有评估大型电网电压暂降严重程度方法的步骤流程如图 1 所示。由图 1 可知，该评估流程的主要用时集中在暂态稳定计算与数据存储，两者存在顺接关系且多次循环执行。若采用串行仿真方法，则存在以下两个问题：

1) 仿真效率低、耗时长：每个短路故障仿真被逐一地执行，仿真计算与数据存储相互等待，无法充分发挥现有计算机多核心处理器的计算资源，导致串行方法效率较低。即使采用高性能仿真平台，执行一次暂降仿真并储存数据也需要 2 s。在某省实际电网全网暂降仿真中，即使每条线路简单设置 3 处故障，使用串行方法也将耗时约 8 h。

2) 可靠性差：各部分相关程序顺序执行，缺少系统性管理机制，同时文件格式、调用仿真失败等错误均易造成程序崩溃。而且当线路短路故障仿真出现错误时，该方法无法确定具体仿真出错的线路，因此为保证仿真任务的完整性只能重新设置全网电压暂降仿真。

1.2 基于多 Agent 系统的设计思路

多 Agent 系统是由多个 Agent 松散耦合而成的集合体，这些 Agent 相互作用从而解决由一个单体无法解决的复杂问题^[20-21]，同时每个 Agent 具有自

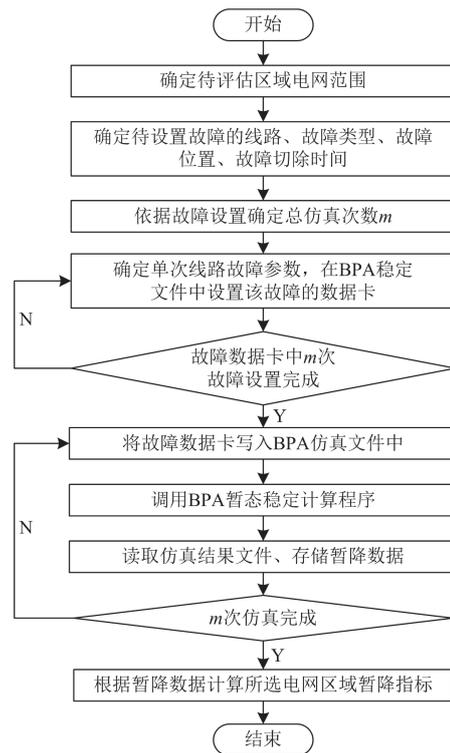


图 1 现有电压暂降评估方法流程

Fig. 1 Flow chart of existing voltage sag evaluation method

主性、交互性和反应性，能主动感知计算资源和通信消息并适时地做出响应^[22]。实现基于多 Agent 系统的电压暂降仿真，不仅需要考虑实际运行环境以及仿真任务在时间、空间上的耦合程度，还需要考虑多 Agent 系统中的层次结构和各 Agent 间的冲突和协同等^[23]。本文针对暂态稳定计算与数据存储分别构造独立的 Agent，通过两者协同来优化计算资源分配，具体思路如下：

1) 暂态稳定计算：异步并行多个仿真计算 Agent 来动态地执行线路故障仿真。一方面，每个 Agent 在执行仿真计算时不存在耦合联系，使不同的仿真任务不会相互影响；另一方面，异步并行的方式可以充分利用计算资源，更高效灵活地执行仿真任务。

2) 数据存储：构造一个 Agent 专职负责数据存储，可确保单一地访问数据存储文件以避免访问冲突；也可让数据存储与仿真计算解耦，使两者能够并行运行，可进一步缩短整体时间。

2 大型电网电压暂降评估架构

本文将电压暂降仿真任务分解为网架解析、故障设置、仿真计算和结果读取等子任务，再依据子任务建立多 Agent 系统模型并提出各 Agent 间的协

同算法, 如图 2 所示。各 Agent 协同优化计算资源的

分配方式, 使多核心处理器负载均衡并被充分利用。

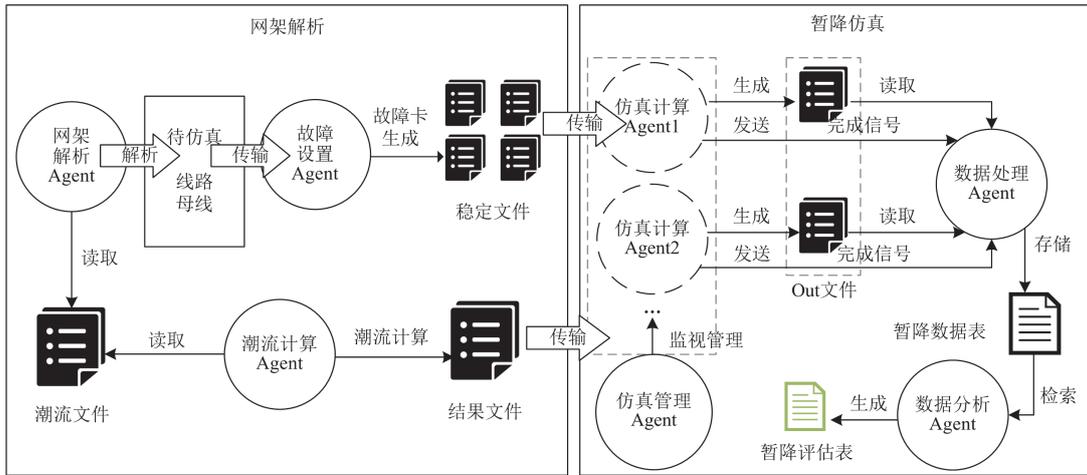


图 2 基于多 Agent 系统的大型电网电压暂降评估架构

Fig. 2 Voltage sag assessment architecture of large power grid based on multi-Agent system

2.1 网架解析、潮流计算、故障设置 Agent

网架解析 Agent 解析潮流文件的网架信息, 获取待仿真线路和待监视母线。该 Agent 首先扫描待评估大型电网各电压等级的母线, 记录母线名称和对应的基准电压, 并将其作为待监视母线节点; 再通过母线名称与基准电压匹配关联线路作为待设置故障的线路。当解析结束后, 该 Agent 将解析结果告知故障设置 Agent。

潮流计算 Agent 调用 BPA 软件计算潮流, 生成结果文件, 为暂态计算提供初始电压、初始电压相角、潮流分布等电网稳态信息。

故障设置 Agent 根据线路信息和所设置的故障信息生成可被 BPA 识别的故障卡, 确保故障仿真不会因为故障参数填写错误而终止。同时, 该 Agent 对每个独立的故障参数进行编号, 并生成对应的稳定文件, 最后将编号告知仿真管理 Agent, 由其分配故障仿真。

2.2 仿真计算与仿真管理 Agent

仿真计算 Agent(下文简称“计算 Agent”)与仿真管理 Agent(下文简称“管理 Agent”)为该多 Agent 系统的核心, 两者协调配合以动态执行海量电压暂降仿真。计算 Agent 与管理 Agent 协同交互示意图如图 3 所示。

1) 动态仿真发布

管理 Agent 实时跟踪 CPU 核心的计算资源, 选取资源占用率最低的核心发布计算 Agent 并向其发送仿真任务消息, 直至所有核心均被用于仿真计算。当计算 Agent 运行结束并释放资源后, 管理 Agent 将重新发布新的计算 Agent 执行仿真。

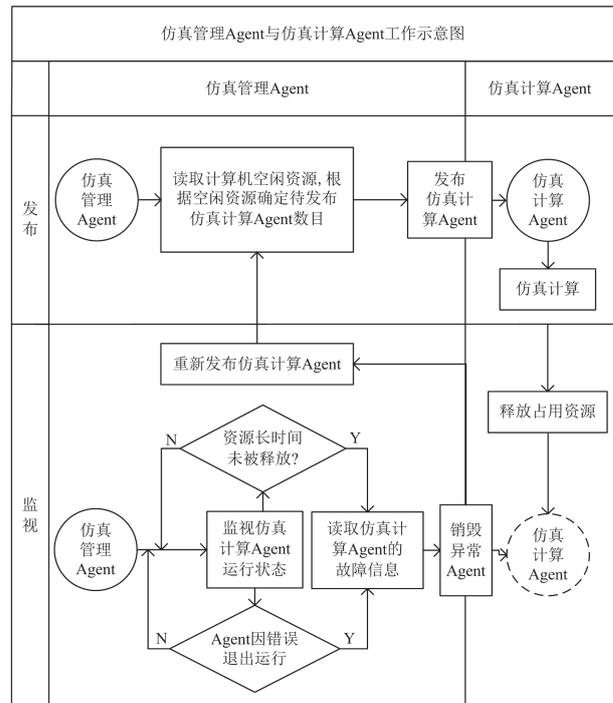


图 3 计算 Agent 与管理 Agent 协同交互示意图

Fig. 3 Collaboration interactive schematic diagram between computing Agent and managing Agent

虽然所发布的计算 Agent 独立运行, 互不影响, 但计算 Agent 调用的 BPA 软件为共同部分。为避免多个计算 Agent 访问共同的内存出现冲突问题, 本文方法采用建立缓存区的方式: 每个计算 Agent 启动时, 在本地生成一个文件缓存区, 将必要的 BPA 组件和仿真模型复制进该缓存区, 使仿真计算所涉及的组件和数据文件为独立部分, 以保证互不影响。

单次故障仿真结束后, 计算 Agent 删除所用的组件与文件缓存区并释放资源。

计算 Agent 采用自释放机制来替代通知管理 Agent 再布置任务的交互机制, 可以避免管理 Agent 与计算 Agent 频繁通信, 减少通信耗时和错误机率。

2) 异常仿真监视

计算 Agent 的异常情况主要为以下两种。

情况 1: 当设置的线路仿真参数有误(线路名称错误、短路故障参数错误等), BPA 软件将停止计算, 同时处于中断运行状态, 无法自动退出运行, 导致计算 Agent 长时间运行, 且无法释放资源。

情况 2: 当调用 BPA 软件失败或 BPA 软件在仿真计算过程中出现错误退出运行, 计算 Agent 将出现运行错误, 导致计算 Agent 无法自动删除所用的 BPA 组件和文件缓存区。

管理 Agent 实时监视计算 Agent, 当所监视的计算 Agent 出现以上异常时, 管理 Agent 将根据事先发给存在异常的计算 Agent 的消息记录, 确定具体仿真出错的线路, 并重新发布计算 Agent 用于仿真计算, 确保仿真任务的完整性。

2.3 数据处理与数据分析 Agent

数据处理 Agent 读取与存储仿真结果数据; 数据分析 Agent 负责输出母线节点电压暂降指标。

在实际运行中, 电网规模庞大, 需仿真线路数目与需监视母线数量较多, 同时全网线路短路故障仿真时会同一条线路多处位置设置故障, 由此估算完成一次全网仿真将产生近百万数量级的暂降数据。另一方面在多个计算 Agent 运行的环境下, 可能会在极短的时间内产生多个结果文件, 且这些结果文件可能还未被计算 Agent 解除占用。如果仿真计算 Agent 与数据处理 Agent 同时对同一结果文件进行访问, 系统将出现访问冲突, 甚至可能造成系统崩溃。为提高仿真容错率, 需制定合理的 Agent 通信机制来告知各 Agent 所拥有的文件访问权限, 以此规避文件访问冲突的问题。

本方案构造了计算 Agent 与数据处理 Agent 的单向通信机制。当计算 Agent 运行结束时, 该 Agent 会以“暂降编号+待仿真线路”的格式发送仿真完成信号至数据处理 Agent; 当数据处理 Agent 接收到信号时, 该 Agent 会将信号写入缓存中, 然后按缓存中的格式信息逐一将对应的暂降数据写入暂降数据表中。仿真计算与数据存储的时序关系示意图如图 4 所示。

由图 4 可以直观地看出, 本方案可使仿真计算和数据存储异步并行, 完成 3 次仿真计算和数据存储的用时明显缩短。

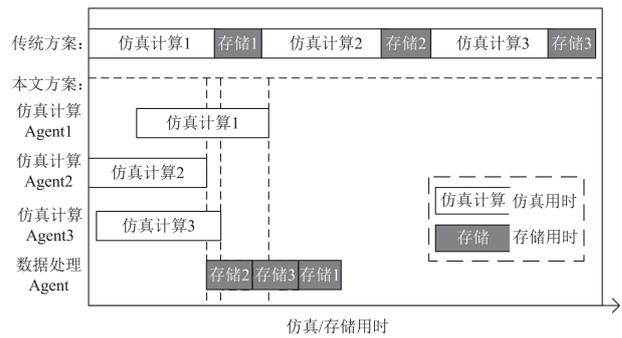


图 4 仿真计算与数据存储的时序关系示意图

Fig. 4 Diagram of time sequence relationship between simulation calculation and data storage

3 指标计算

据监测系统统计, 约 95% 的电压暂降是由电网线路短路故障引起的, 且大型电动机启动、变压器投切等引起的暂降可通过提前采取相关措施消除暂降的影响^[12], 因此本文考虑工程实用性, 将线路短路故障概率作为电网发生暂降的概率。假定线路故障服从平均分布, 同时考虑线路 4 种故障类型(单相接地、两相接地、相间短路、三相短路)的比例, 并依据线路每年发生的故障次数给每一线路分配故障权重^[24], 计算公式为

$$F = NQL \quad (1)$$

式中: F 表示线路的故障权重; N 表示线路每年每千米故障次数; Q 表示线路发生故障类型的比例; L 表示线路的长度。

系统平均方根值变动频率指标(system average RMS frequency index, SARFI)以监测时段内单一测量点跌落致某一电压阈值的频次, 评估该测点的暂降严重程度^[25]。然而该指标依赖实测数据, 以目前的工程实际来看, 观测的时间和空间维度上都严重不足:

1) 时间维度上, 监测终端安装时间短, 大量小概率的电压暂降事件未观测到。仅用监测数据评估测量点的暂降风险容易遗漏重要风险。

2) 空间维度上, 当前监测终端未覆盖全网, 无法观测到暂降发生时对全网母线的影 响, 存在关键影响未能有效识别的风险。

为克服上述问题, 基于当前工程实际需求, 本文提出一种基于仿真的电压暂降风险评估指标。通过设置海量抽样的故障仿真来反映实际电网的暂降情况, 进而统计 SARFI 指标。SARFI 指标计算公式为

$$S_{\text{SARFI},X}(i) = \frac{\sum_{k=1}^m F_{(i,k)}}{\sum_{j=1}^n F_{(i,j)}} \quad (2)$$

式中: $S_{SARFI,X}(i)$ 表示母线 i 电压幅值低于 X 的概率, X 为平均方根值电压阈值; m 表示母线 i 电压低于 X 的总次数; $F_{(i,k)}$ 表示第 k 次母线 i 电压低于 X 时仿真线路的故障权重; n 表示样本总仿真次数; $F_{(i,j)}$ 表示第 j 次仿真线路的故障权重。

4 算例测试

4.1 实际电网模型与测试平台

本次测试采用华东电网某省的 BPA 数据为仿真模型。在该省共有 1292 条待仿真线路与 746 个待监视母线节点。仿真网架信息见附录 A 表 A1, 线路故障参数见附录 A 表 A2 和表 A3^[14,26]。

仿真计算速度与测试平台性能有关, 测试平台的每秒浮点运算次数高, 则计算速度越高。本文测试平台软硬件信息如表 1 所示。

表 1 测试平台软硬件信息

| 类型 | 版本 | 用途 |
|------|------------|------|
| CPU | R7-5800H | 运算资源 |
| 运行内存 | 16 GB | 数据缓存 |
| 操作系统 | Windows 10 | 资源分配 |

4.2 仿真设定与暂降评估

仿真设定需要考虑故障位置与故障持续时间。

1) 故障位置: 暂降评估流程需要在各线路设置故障。若按蒙特卡洛方法的思路需要在全网设置密集随机故障, 则在大型电网全网仿真时将耗费大量时间。文献[27]指出当线路故障服从平均分布时, 可以将线路分段, 然后在每一小段设置故障来等效该段线路故障的影响。为保证等效精度, 同时以较少的故障点表征更多的信息, 本文将线路平均分成 3 段, 在线路的 33%、50%和 66%处设置故障来等效所均分的 3 段线路故障时对母线电压幅值的影响。在 SARFI 值统计上, 以 $S_{SARFI,50}$ 为例, 虽然本文设置故障的方法对故障线路首末端母线暂降幅值影响较大, 但由于故障计算时首末端母线的暂降幅值均小于 0.5 p.u., 均可被 $S_{SARFI,50}$ 所统计, 因此该等效方法对 SARFI 值统计的影响可忽略不计。

2) 故障持续时间: 本文设置 500 kV 与 220 kV 电压等级线路的故障持续时间分别为 90 ms、120 ms^[28], 110 kV 和 35 kV 电压等级线路的故障持续时间分别服从[0.1, 0.5] s、[0.5, 0.9] s 范围内均匀分布, 10 kV 电压等级线路的故障持续时间服从期望为 0.5 s、标准差为 0.133 的正态分布^[14]。

在相同线路故障参数的前提下, 将本文方法仿真所得的各母线节点 SARFI 计算结果与以下两种

方法进行比较: 方法一, 基于蒙特卡洛法随机仿真 50 000 次(基准); 方法二, 基于蒙特卡洛法随机仿真 15 504 次(本文方法仿真次数)。蒙特卡洛模拟实验的次数越多, 误差率越低, 评估结果越接近真实概率值。统计方法二、本文方法相较于方法一的相对误差, 限于篇幅, 随机选择 10 个待评估节点, 在表 2 中展示 $S_{SARFI,90}$ 值对比结果, 其他 SARFI 值 ($S_{SARFI,80}$ 、 $S_{SARFI,70}$ 和 $S_{SARFI,50}$)结果如附录 A 表 A4 所示。

表 2 母线节点 $S_{SARFI,90}$ 值对比结果

| 节点 | 方法一 (基准) | 方法二 | 方法二相 对误差/% | 本文 方法 | 本文方法相 对误差/% |
|----|-------------|--------|---------------|----------|----------------|
| a | 0.0675 | 0.0713 | 5.630 | 0.0670 | 0.741 |
| b | 0.0673 | 0.0709 | 5.349 | 0.0665 | 1.189 |
| c | 0.0672 | 0.0697 | 3.720 | 0.0658 | 2.083 |
| d | 0.0549 | 0.0569 | 3.643 | 0.0515 | 6.193 |
| e | 0.0456 | 0.0520 | 14.035 | 0.0447 | 1.974 |
| f | 0.0416 | 0.0474 | 13.942 | 0.0405 | 2.644 |
| g | 0.0418 | 0.0474 | 13.397 | 0.0399 | 4.545 |
| h | 0.0321 | 0.0369 | 14.953 | 0.0320 | 0.312 |
| i | 0.0299 | 0.0367 | 22.742 | 0.0299 | 0.000 |
| j | 0.0296 | 0.0364 | 22.973 | 0.0295 | 0.338 |

从表 2 和附录 A 表 A4 可知, 本文方法所计算 SARFI 指标的相对误差绝大多数比较方法二低。在 746 个待评估母线的 SARFI 指标中, 本文方法的相对误差低于方法二的数量占比分别为 93.83%($S_{SARFI,90}$)、94.77%($S_{SARFI,80}$)、92.76%($S_{SARFI,70}$)和 90.54%($S_{SARFI,50}$), 且相对误差均小于 10%。其中, 低电压阈值 SARFI 值的相对误差低于方法二的占比较少, 这是由于本文所使用的故障影响等效方法(如本节 1)中所述)在等效过程中对邻近节点的暂降幅值影响大于对远处节点的暂降幅值影响, 且邻近节点的暂降幅值低于远处节点, 造成低电压幅值误差大。但综上所述, 本文评估结果整体准确率均有较大提升。若要提高评估精度, 只需划分更多的线路段, 但将降低评估效率。

4.3 方法用时对比

本文通过设置相同的 BPA 文件与全网仿真任务来对比不同方法的用时。考虑到平台 CPU 性能、负载率与内存实时变化、计时误差等因素, 分别使用传统串行方法、传统任务级多线程并行方法(仿真计算与数据存储未解耦)和本文方法执行 10 次全网仿真, 通过对比 3 种方法的平均仿真计算用时, 分析本文方法的效率提升性能与效率优化环节。以上 3 种方法平均用时统计结果如表 3 所示。

表 3 3 种方法平均仿真计算用时

Table 3 Average simulation calculation time of three methods

| 仿真次数 | 全网暂降仿真用时 | | |
|--------|----------|---------|---------|
| | 串行方法 | 多线程并行方法 | 本文方法 |
| 15 504 | 7:45:02 | 2:30:40 | 2:01:18 |

由此可得，多线程并行方法与本文方法明显缩短了海量线路故障仿真时间，其中本文方法与传统多线程并行方法相比，用时更少。全网线路故障仿真用时包括故障卡生成用时、仿真计算用时和数据存储用时。在故障卡生成用时上，三者方法近似相等，但在仿真计算用时与数据存储用时上，本文方法构造多 Agent 系统使多个仿真计算 Agent 异步并行，同时构造数据处理 Agent 在数据存储上进行优化，使数据存储与仿真计算异步并行，加快了数据存储效率。因此，本文方法与传统多线程并行方法相比，用时更少。

4.4 不同性能平台效率测试

为测试本方法在不同性能平台上的效率，人为进入测试平台的 BIOS 关闭测试平台的部分单元核心以模拟不同性能平台。本测试依次将 CPU 核数从单核设置至八核，分别执行 15 504 次仿真任务并统计仿真总用时，不同平台耗时统计结果如表 4 所示。

表 4 不同平台耗时统计结果

Table 4 Time consuming statistical results of different platforms

| CPU 核数 | 仿真总用时 | CPU 核数 | 仿真总用时 |
|--------|---------|--------|---------|
| 1 | 6:40:41 | 5 | 2:36:13 |
| 2 | 4:06:41 | 6 | 2:20:23 |
| 3 | 3:00:12 | 7 | 2:07:09 |
| 4 | 2:43:23 | 8 | 2:01:18 |

由表 4 可得，仿真总用时随 CPU 核数的增加而降低，由此可见，本文所构造的多 Agent 系统可依据计算资源动态扩展仿真计算 Agent 的数量，具有一定的并行可扩展性。

为量化该方法的性能与异步并行效率，本文引入多 Agent 并行加速比与异步并行效率指标。并行加速比反映并行效率提升的能力，并行算法效率反映执行协同算法的效率^[29]。多 Agent 并行加速比计算公式为

$$S_p = \frac{T_1}{T_p} \quad (3)$$

式中： S_p 为 CPU 核心数为 P 时的加速比； T_1 为串行计算所需的时间； T_p 为 CPU 核心数为 P 时，并行仿真计算所需的时间。

并行算法效率计算公式为

$$E_p = \frac{T_1}{T_p P} \quad (4)$$

式中， E_p 为 CPU 核心数为 P 时的并行算法效率。

为分析方法各部分效率，统计了整体用时和仿真计算用时，并依据式(3)和式(4)分别计算加速比与并行算法效率。不同性能平台的整体和仿真计算的加速比与并行算法效率曲线如图 5 所示。

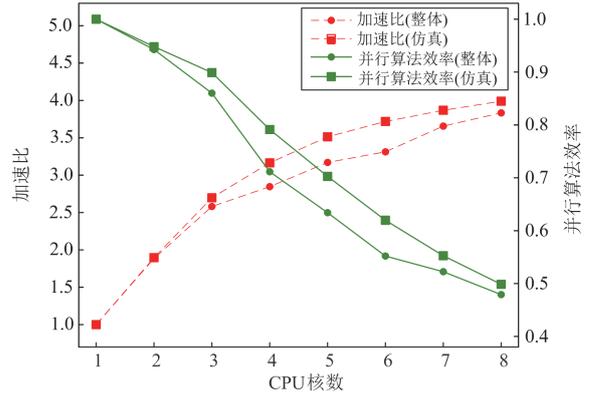


图 5 不同性能平台的整体和仿真计算的加速比与并行算法效率

Fig. 5 Overall and simulation speedup ratio and parallel calculation algorithm efficiency of different performance platforms

由图 5 可知，随着核数的增加，加速比提高，但并行算法效率反而降低。这是由于核数增加，管理 Agent 发布的计算 Agent 数量增加，导致多 Agent 间协同开销增大，使并行算法效率降低。同时可以看出，仿真计算的加速比和并行效率均比整体高，这是由于整体时间中的故障卡生成与数据存储均涉及 IO 读写，单硬盘时为串行，因此制约整体加速比提升。另一方面，如果系统中存在多个数据处理 Agent，但在某一时刻也只存在一个 Agent 执行读写任务，其余 Agent 处于堵塞状态，因此本方案仅设计一个数据处理 Agent。

4.5 可靠性测试

对系统可靠性进行测试。通过外部干预仿真某次线路短路故障来模拟 2.2 节所叙述的异常情况 1 和情况 2，以此验证本文方法的可靠性。测试结果如表 5 所示。

由表 5 可知，测试中仿真结果均完整，可证明本文方法的可靠性。这是由于管理 Agent 存在监视机制，可在仿真错误时重新分配资源并执行相应的仿真任务，保证仿真任务不会遗失。

表 5 系统可靠性测试结果

Table 5 System reliability test results

| 测试内容 | 异常记录 | 测试结果 |
|--|---------------------|--------|
| 10 次全网仿真(如 4.3 节中测试过程) | 无 | |
| 在线路 1 故障仿真时写入错误的故障参数使 BPA 软件无法正常计算(模拟情况 1) | 线路 1 三相故障 仿真出现异常 | 仿真结果完整 |
| 在线路 2 故障仿真期间强制关闭 BPA 软件(模拟情况 2) | 线路 2 相间故障 仿真出现异常 | |

5 结语

本文提出了一种基于多 Agent 系统的大型电网电压暂降仿真方法, 算例测试结果表明:

1) 当执行大型电网全网电压暂降仿真任务时, 本文方法与现有方法相比, 效率高且扩展性能好, 提高了基于 BPA 进行省市一级电网电压暂降仿真的工程实用性。

2) 该方法的加速比受制于并行协同开销与计算机 IO 读写机制, 后续可进一步优化协同算法或尝试使用分布式储存技术进一步提高该方法的仿真效率。

3) 后续可将该方法扩展运用于需要全网批量进行故障计算的场合, 如基于 BPA 的全网 $N-1$ 故障分析、设备故障临界切除时间扫描等应用中, 进一步提高工程实用价值。

附录 A

表 A1 仿真网架

Table A1 Simulation grid

| 电压等级/kV | 500 | 220 | 110 | 35 | 10 | 合计 |
|---------|-----|-----|-----|----|-----|------|
| 线路数量 | 84 | 621 | 122 | 9 | 456 | 1292 |
| 母线数量 | 36 | 321 | 137 | 77 | 112 | 683 |

表 A2 各电压等级线路每年每千米故障次数

Table A2 Number of faults per kilometer of lines every year with different voltage levels

| 电压等级/kV | 故障次数 | 电压等级/kV | 故障次数 |
|---------|--------|---------|--------|
| 500 | 0.0015 | 35 | 0.0268 |
| 220 | 0.0033 | 10 | 0.1023 |
| 110 | 0.0089 | | |

表 A3 各电压等级线路故障类型比例

Table A3 Proportion of fault types of lines with different voltage levels

| 电压等级/ kV | 单相接 地/% | 相间短 路/% | 两相接 地/% | 三相短 路/% |
|-------------|------------|------------|------------|------------|
| 500 | 93.00 | 4.00 | 2.00 | 1.00 |
| 220 | 78.26 | 5.80 | 11.59 | 4.35 |
| 110 | 81.05 | 3.16 | 6.31 | 9.48 |
| 35 | 62.96 | 8.64 | 17.29 | 11.11 |
| 10 | 52.26 | 11.61 | 23.23 | 12.90 |

表 A4 母线节点 SARFI 值对比结果

Table A4 Comparison results of bus node SARFI value

| SARFI | 节点 | 方法一(基准) | 方法二 | 方法二相对误差/% | 本文方法 | 本文方法相对误差/% |
|----------------|----|---------|--------|-----------|--------|------------|
| $S_{SARFI,80}$ | a | 0.0548 | 0.0537 | 2.007 | 0.0516 | 5.839 |
| | b | 0.0600 | 0.0624 | 4.000 | 0.0605 | 0.833 |
| | c | 0.0599 | 0.0624 | 4.174 | 0.0605 | 1.002 |
| | d | 0.0434 | 0.0456 | 5.069 | 0.0421 | 2.995 |
| | e | 0.0382 | 0.0407 | 6.545 | 0.0387 | 1.309 |
| | f | 0.0372 | 0.0420 | 12.90 | 0.0371 | 0.269 |
| | g | 0.0372 | 0.0422 | 13.441 | 0.0370 | 0.538 |
| | h | 0.0280 | 0.0313 | 11.786 | 0.0285 | 1.786 |
| | i | 0.0263 | 0.0301 | 14.449 | 0.0258 | 1.901 |
| | j | 0.0262 | 0.0302 | 15.267 | 0.0260 | 0.763 |
| $S_{SARFI,70}$ | a | 0.0442 | 0.0453 | 2.489 | 0.0438 | 0.905 |
| | b | 0.0508 | 0.0531 | 4.528 | 0.0532 | 4.724 |
| | c | 0.0507 | 0.0531 | 4.734 | 0.0530 | 4.536 |
| | d | 0.0359 | 0.0370 | 3.064 | 0.0365 | 1.671 |
| | e | 0.0325 | 0.0343 | 5.538 | 0.0327 | 0.615 |
| | f | 0.0295 | 0.0339 | 14.915 | 0.0315 | 6.780 |
| | g | 0.0297 | 0.0340 | 14.478 | 0.0320 | 7.744 |
| | h | 0.0229 | 0.0256 | 11.790 | 0.0246 | 7.424 |
| | i | 0.0218 | 0.0257 | 17.890 | 0.0228 | 4.587 |
| | j | 0.0214 | 0.0250 | 16.822 | 0.0224 | 4.673 |
| $S_{SARFI,50}$ | a | 0.0248 | 0.0243 | 2.016 | 0.0249 | 0.403 |
| | b | 0.0285 | 0.0307 | 7.719 | 0.0283 | 0.702 |
| | c | 0.0281 | 0.0300 | 6.762 | 0.0278 | 1.068 |
| | d | 0.0186 | 0.0165 | 11.290 | 0.0195 | 4.839 |
| | e | 0.0165 | 0.0151 | 8.485 | 0.0168 | 1.818 |
| | f | 0.0136 | 0.0137 | 0.735 | 0.0132 | 2.941 |
| | g | 0.0139 | 0.0140 | 0.719 | 0.0140 | 0.719 |
| | h | 0.0077 | 0.0084 | 9.091 | 0.0073 | 5.195 |
| | i | 0.0101 | 0.0111 | 9.901 | 0.0110 | 8.911 |
| | j | 0.0090 | 0.0100 | 11.111 | 0.0097 | 7.778 |

参考文献

- [1] 李长松, 陈韵竹, 肖先勇, 等. 电压暂降保险机制的量化分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 99-104, 207. LI Changsong, CHEN Yunzhu, XIAO Xianyong, et al. Quantitative analysis on insurance mechanisms for voltage sag[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 99-104, 207.
- [2] 栾乐, 马智远, 莫文雄, 等. 考虑不同敏感设备耐受特性的用户侧电压暂降严重程度区间评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 140-148. LUAN Le, MA Zhiyuan, MO Wenxiong, et al. Voltage sag severity interval assessment method for user side considering tolerance characteristics of equipment of differing sensitivity[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 140-148.
- [3] 徐方维, 龙晨瑞, 郭凯, 等. 基于正序分量相位差的电压暂降源定位方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(7): 7-15. XU Fangwei, LONG Chenrui, GUO Kai, et al. Location method of voltage sag source based on phase difference of positive sequence components[J]. Smart Power, 2022, 50(7): 7-15.
- [4] 辛峰, 尤向阳, 葛笑寒, 等. 基于空间相量模型的三相电压暂降扰动特征提取与分类[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 58-65. XIN Feng, YOU Xiangyang, GE Xiaohan, et al. Feature extraction and classification of three-phase voltage dips based on a space phasor model[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 58-65.
- [5] 胡文曦, 肖先勇, 金耘岭, 等. 电压暂降波形数据分析法及其在监测系统中的应用[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4193-4199. HU Wenxi, XIAO Xianyong, JIN Yunling, et al. Voltage sag waveform data analysis method and its application in monitoring system[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4193-4199.
- [6] LI Ruisheng, WONG P, WANG Kun, et al. Power quality enhancement and engineering application with high permeability distributed photovoltaic access to low-voltage distribution networks in Australia[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 183-189.
- [7] 张嫣, 林涌艺, 邵振国. 电压暂降可观约束下的定位监测点多目标优化配置[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2375-2383. ZHANG Yan, LIN Yongyi, SHAO Zhenguo. Multi-objective optimal allocation of monitors for voltage sag location under observability constraint[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(11): 2375-2383.
- [8] DA COSTA L A, DA SILVA GAZZANA D, LEBORGNE R C. Investigation of main and secondary transformers on mitigation of voltage sags, swells and interruptions in unbalanced medium voltage distribution systems[J]. Electric Power Components and Systems, 2020, 48(8): 858-869.
- [9] 陆承宇, 黄弘扬, 徐群伟, 等. 基于多维特征和 Hausdorff 距离的电压暂降治理成本估计[J]. 中国电力, 2021, 54(8): 11-18. LU Chengyu, HUANG Hongyang, XU Qunwei, et al. Cost estimation for voltage sag control based on multidimensional characteristics and Hausdorff distance[J]. Electric Power, 2021, 54(8): 11-18.
- [10] 徐悦, 孙建军, 丁凯, 等. 基于场景构建的电压暂降特征量随机评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 105-112. XU Yue, SUN Jianjun, DING Kai, et al. Random evaluation method of voltage sag characteristics based on scenario construction[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 105-112.
- [11] BILGUNDI S K, SACHIN R, PRADEEPA H, et al. Grid power quality enhancement using an ANFIS optimized PI controller for DG[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 26-39.
- [12] 崔建斌. 基于不确定性理论的敏感设备电压暂降敏感度评估方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021. CUI Jianbin. Research on assessment method of equipment sensitivity to voltage sags based on uncertainty theory[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021.
- [13] 李顺祎, 汪颖, 杨敏辉. 基于改进 K-means 聚类的配电网电压暂降频次估计法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(6): 103-112. LI Shunyi, WANG Ying, YANG Minhui. Estimation method of voltage sag frequency in distribution network based on improved K-means clustering algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6): 103-112.
- [14] 王建勋, 张逸, 陈晶腾, 等. 省级电网电压暂降评估与工业用户潜在供电点优选[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 201-207, 224. WANG Jianxun, ZHANG Yi, CHEN Jingteng, et al. Evaluation of provincial power grid voltage sag and optimal selection of potential power supply points for industrial users[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 201-207, 224.
- [15] 马明, 赵月杭, 易皓. 基于频谱搬移的无锁相环型电压暂降检测方法研究[J]. 供用电, 2021, 38(10): 41-50, 56.

- MA Ming, ZHAO Yuehang, YI Hao. A voltage sag detection method based on spectrum shift and non-PLL techniques[J]. *Distribution & Utilization*, 2021, 38(10): 41-50, 56.
- [16] 叶筱怡, 刘海涛, 吕干云, 等. 基于 BAS-BP 分类器模型的电压暂降源识别[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(1): 77-83.
- YE Xiaoyi, LIU Haitao, LÜ Ganyun, et al. Identification of voltage sag source based on BAS-BP classifier model[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(1): 77-83.
- [17] 曾江, 蔡东阳. 基于组合权重的蒙特卡洛电压暂降评估方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(5): 1469-1475.
- ZENG Jiang, CAI Dongyang. A Monte Carlo assessment method of voltage sags based on combination weight[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(5): 1469-1475.
- [18] 易杨, 常宝立, 李力, 等. PSD-BPA 潮流计算数据卡的自动批量生成和修改[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(10): 124-128.
- YI Yang, CHANG Baoli, LI Li, et al. Automatic batch generation and modification of PSD-BPA data-cards for power flow calculation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(10): 124-128.
- [19] 罗彬, 刘汉伟, 梅涛, 等. 基于 PSD-BPA 的电网潮流稳定计算分析平台开发与应用[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(17): 119-123.
- LUO Bin, LIU Hanwei, MEI Tao, et al. Development and application of power flow and stability analysis platform based on PSD-BPA[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(17): 119-123.
- [20] 张逸, 杨洪耕, 叶茂清, 等. 基于多 Agent 的电能质量辅助服务平台[J]. *电力自动化设备*, 2012, 32(12): 92-97.
- ZHANG Yi, YANG Honggeng, YE Maoqing, et al. Power quality ancillary service platform based on multi-Agent[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(12): 92-97.
- [21] SHAHBAZI H, KARBALAEI F. Decentralized voltage control of power systems using multi-Agent systems[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2020, 8(2): 249-259.
- [22] 张逸, 彭灿, 张默霓. 基于移动 Agent 的电能质量监测数据管理方案[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(22): 164-169.
- ZHANG Yi, PENG Can, ZHANG Moni. A data management scheme for power quality monitoring data based on mobile Agent[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(22): 164-169.
- [23] 屈洪春, 姚献慧, 尹力. 多 Agent 系统在空间直观仿真建模中的并行化[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(3): 446-454.
- QU Hongchun, YAO Xianhui, YIN Li. Parallel computing of multi-Agent system in spatially-explicit modeling and simulation[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(3): 446-454.
- [24] 叶曦, 刘开培, 李志伟. 不确定条件下计及线路保护动作特性的电压暂降频次评估[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(3): 169-176.
- YE Xi, LIU Kaipei, LI Zhiwei. Voltage sag frequency assessment considering action characteristics of line protection in uncertain conditions[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(3): 169-176.
- [25] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量电压暂降与短时中断: GB/T30137—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [26] 国家能源局. 2017 年全国电力可靠性年度报告[R/OL]. [2022-03-10]. http://www.nea.gov.cn/down/kekaoxingbao_gao2017.pdf.
- [27] 易杨, 张尧, 钟庆. 基于蒙特卡罗方法的大型电力用户电压暂降评估[J]. *电网技术*, 2008, 32(6): 57-60, 75.
- YI Yang, ZHANG Yao, ZHONG Qing. Assessment of voltage sags in large power consumer based on Monte Carlo method[J]. *Power System Technology*, 2008, 32(6): 57-60, 75.
- [28] 国家电网公司. 国家电网安全稳定计算技术规范: Q/GDW1404—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [29] 潘风蕊, 李涛, 邢立冬, 等. 面向 OpenVX 核心图像处理函数的并行架构设计[J]. *计算机科学与探索*, 2022, 16(7): 1570-1582.
- PAN Fengrui, LI Tao, XING Lidong, et al. Parallel architecture design for OpenVX kernel image processing functions[J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2022, 16(7): 1570-1582.

收稿日期: 2022-09-12; 修回日期: 2022-11-11

作者简介:

黄佳铭(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制技术; E-mail: 419159645@qq.com

张逸(1984—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量、主动配电网及电力数据分析。E-mail: zhangyi@fzu.edu.cn

(编辑 周金梅)