

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230142

# 基于 PSASP 的电网智能仿真工具设计与实现

李锋<sup>1</sup>, 王莹<sup>1</sup>, 周良松<sup>2</sup>, 姚占东<sup>2</sup>

(1. 国家电网有限公司华中分部, 湖北 武汉 430077; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 现有通用电力系统仿真软件自动化和智能化程度不高的问题极大影响了安全稳定分析工作的效率。为此, 从工程技术人员的实际需求出发, 基于电力系统分析综合程序(power system analysis software package, PSASP)设计并开发了电网智能仿真计算工具。该工具通过从数据解析与处理、计算功能优化、结果分析自动化 3 个方面对现有软件进行了优化, 提升工作效率。引入达梦数据库系统, 实现海量数据的存储、计算、查询和共享。开发了厂站接线图自动绘制功能, 可自动实现元件连接关系的可视化展示。开发了运行方式数据自动生成功能, 可形成对应海量运行场景的潮流作业数据。开发了静态安全自动分析功能, 可进行  $N-1$  开断的自动计算和结果的智能分析与展示。最后, 以华中电网安全稳定分析为例, 验证了智能仿真工具的实用效果。

**关键词:** 仿真工具; 安全稳定分析; 数据交互; 接线图绘制; 自动计算

## Design and implementation of a power grid intelligent simulation tool based on PSASP

LI Feng<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>1</sup>, ZHOU Liangsong<sup>2</sup>, YAO Zhandong<sup>2</sup>

(1. Central China Branch, State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The low degree of automation and intelligence of existing general power system simulation software has greatly affected the efficiency of security and stability analysis. An intelligent simulation tool for a power grid based on PSASP is designed and developed according to the actual needs of engineers and technicians. The simulation software is optimized to improve work efficiency from three aspects: data analysis and processing, optimization of calculation function and automation of result analysis. The Dameng database system is introduced to realize the storage, calculation, query and sharing of massive data. The function of power station wiring diagram auto-graphing is developed to automatically achieve visual display of the connection relationship of elements. The function of operating mode data automatic generation is developed to form power flow data for mass operational modes. The function of automatic static safety analysis can automatically realize calculation of  $N-1$  disconnection and the intelligent analysis and display of results. Finally, taking security and stability analysis of the Central China power grid as an example, the practical effect of power grid intelligent simulation tool is illustrated.

This work is supported by Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51707074).

**Key words:** simulation tool; security and stability analysis; data exchange; wiring diagram graphing; automatic calculation

## 0 引言

仿真分析是认知大电网安全稳定特性、制定运行控制措施的主要手段, 因此仿真计算及分析工作的准确性和及时性对于保障大电网安全稳定运行和

电力可靠供应愈显重要<sup>[1]</sup>。相应地, 仿真计算分析软件对电网的科学规划、安全稳定运行至关重要。电力系统分析综合程序(power system analysis software package, PSASP)是一套具有我国自主知识产权、功能强大、使用方便的电力系统仿真工具, 广泛应用于我国的电力规划设计、生产调度运行和科学研究等方面<sup>[2-3]</sup>。随着特高压工程的相继投运以及新能源的快速发展, 电网规划和运行面临巨大挑

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金项目资助(51707074); 国家电网有限公司科技项目资助(SGHZ0000JZJS2200228)

战,对电网仿真的规模、精度和速度提出了更高要求<sup>[4-6]</sup>。目前,工程技术人员在使用 PSASP 开展大电网仿真分析时存在以下问题。

### 1) 数据文件无法自动图形化

实际工作中常常需要对 PSASP 数据文件中成千上万个元件及参数进行查阅、统计。传统的 PSASP 数据文件查阅、演示均以文本的形式呈现,新设备投产和老设备退役所引起的拓扑改变需要人工维护,如何将 PSASP 数据文件自动图形化已成为急需解决的技术问题。

### 2) 海量运行方式调整工作量大

为了全面掌握电力系统安全稳定特性,常常需要进行海量运行场景的潮流方式调整,这已成为电网仿真计算中工作量最为繁重的环节之一<sup>[7]</sup>,依靠专业人员经验手动调整潮流的模式难以为继。

### 3) 仿真结果分析耗时长

目前 PSASP 尚无法对仿真计算结果数据自动分析,或仿真结果的自动判断功能准确度不足,主要依赖工程技术人员经验对仿真结果数据进行分析,识别系统薄弱环节并制定运行规定,工作量大、耗时长。

优化仿真工具、提高仿真效率一直是电力系统仿真技术进步的方向。文献[8-9]研究了潮流数据自动整合调整技术,并应用于华北电网。文献[10]将联络线功率调整问题表述为马尔可夫决策过程,并引入近端策略优化算法,可实现联络线功率的自动精确调整。文献[11]通过融合多源实时数据,实现电网运行方式在线计算数据的自动生成。文献[12]开发了电网年度运行方式自动优化计算与报告生成系统。以上研究仅针对现有仿真软件的某一个功能进行优化。文献[13-14]对电力系统开源仿真工具进行了研究,文献[13]介绍了美国电力研究院开发的配电系统开源仿真软件,文献[14]基于 Matlab 开发了一款电力系统动态分析工具,但开源软件更适用于创新研究,实际电网仿真计算仍依托主流商业软件。文献[15]将模拟、物理和数值仿真技术结合,形成满足电力系统实时仿真要求的决策支持系统软硬件,为调度员决策的快速验证和寻优提供支持。文献[16]介绍了国网电力科学研究院开发的安全稳定综合防御系统,可实现数据准备、任务执行和输出结果的自动化处理。文献[17]介绍了新一代特高压交直流电网仿真平台,可实现大电网海量仿真快速计算和远程云计算,但需要依托超算系统。为了突破传统仿真技术的局限性,文献[18-20]研究了全新的电力系统仿真工具。文献[18]设计了基于互联网云平台的大电网智能仿真分析系统的架构,文献

[19]结合先进 IT 技术设计了全新一代电力系统仿真软件的框架结构,但均未具体实现。文献[20]介绍了面向新型电力系统的仿真应用软件开发平台和运行环境 CloudPSS,但需要极高性能的计算、通信能力及高效算法支撑,在实际电网的适用性有待验证。近年来,快速发展的人工智能为电网仿真分析与决策提供了新的思路和方法<sup>[21-23]</sup>。人工智能通过将快速判稳的数据挖掘技术与数值计算方法相结合,可大幅提高暂态稳定评估的计算速度<sup>[24]</sup>,但目前多处于理论研究阶段,尚未实现与现有仿真工具的有机结合。

本文结合实际大电网仿真的工程需求,从计算数据解析、计算过程优化、计算结果分析 3 个方面研究了电网运行方式仿真分析的功能需求,在 PSASP 软件基础上开发了套电网智能仿真工具。该工具包含厂站接线图自动绘制、海量运行方式数据自动生成、静态安全自动分析等新功能,可有效提高电网安全稳定分析工作的效率。

## 1 优化目标与功能设计

基于 PSASP 的电网智能仿真工具设计、开发、运行须满足安全性、实用性、易操作性和可扩展性的要求,以运行方式自动生成、计算功能自动执行、计算结果智能分析、计算报告自动生成目标,构建大电网智能计算分析平台。按照上述原则和目标设计的智能仿真工具功能框架如图 1 所示。

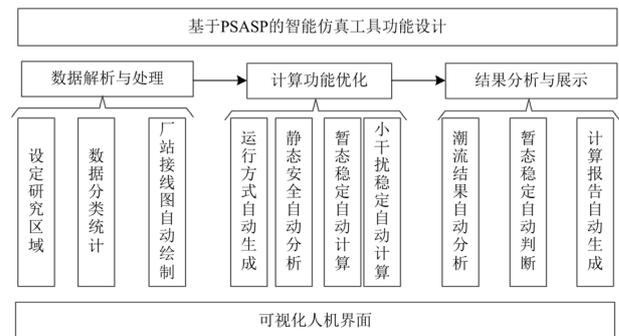


图 1 基于 PSASP 的智能仿真工具功能架构

Fig. 1 Functional architecture design of intelligent simulation tool based on PSASP

### 1.1 数据解析与处理

通过对 PSASP 数据库解析,根据用户需求,实现数据浏览、筛选、比较、统计和图形化展示。

1) 设定研究区域:根据研究区域筛选相关设备,将其设定为一个工程保存在本地数据库中,并在 PSASP 数据库和本地数据库建立映射,可将设备描述改成用户容易理解的内容,方便后续查找。

2) 数据分类统计: 根据用户需求将设备按所属地区、厂站、电压等级分类统计, 比如某个地区的机组旋转备用、容性无功补偿容量等。

3) 厂站接线图自动绘制: 可自动绘制每个厂站或者多个厂站间的电气一次连接图, 并可直接在图上手动修改元件投退状态、参数等模型数据。

### 1.2 计算功能优化

以 PSASP 软件的计算功能为基础, 根据用户需求设定相关计算信息, 实现同类型批量计算任务的自动组织、执行与控制, 并将计算结果保存到历史数据库中, 形成海量计算结果数据。具体包括以下计算功能: 1) 运行方式自动生成; 2) 静态安全自动分析; 3) 暂态稳定自动计算; 4) 小干扰稳定自动计算。

### 1.3 结果分析与展示

根据用户需求确定各类分析计算的目的, 自动从历史数据库中获取计算结果, 并进行统计、判断和分析, 按照定制的规范化报表和报告模板输出结果。具体包括以下功能:

1) 潮流结果自动分析: 自动生成潮流计算结果的统计分析报表, 包括元件初始潮流、故障后潮流、重载率以及潮流转移比等信息, 并支持多个计算作业之间的结果比对。

2) 暂态稳定自动判断: 将暂态稳定计算得到的功角、电压、频率等电气量曲线按不同组进行统计分析, 根据电力系统安全稳定的相关标准和规范智能判断系统是否失稳, 如出现失稳情况给出提示信息并保存。

3) 计算报告自动生成: 根据给定的报告模板, 自动从历史数据库中抽取潮流计算、暂态稳定计算或小干扰稳定计算的结果, 进行整合、归纳和分析, 输出到报告中的对应位置。

## 2 关键技术实现方法

### 2.1 数据解析与交互

PSASP 7.0 及之后的软件版本采用 MySQL 数据库支持, 一般安装在客户端, 用以存储基础数据、计算数据、结果数据以及用户自定义模型及用户程序库。为满足数据共享和安全性的要求, 电网智能仿真软件将数据存储在国内的达梦数据库中, 达梦数据库具有标准开放的 SQL 数据访问接口, 可安装在服务器端。

在开展仿真计算时, 电网智能仿真工具、PSASP 程序、MySQL 数据库、达梦数据库相互间会进行数据交互。数据交互涉及的 MySQL 库、达梦数据库及其存储信息分别如表 1 和表 2 所示。当用户开

展仿真时, 电网智能仿真软件首先从 MySQL 存储数据的 SLG\*文件夹里面获取相关数据, 然后调用 PSASP 程序的计算功能, 进行计算分析; 计算完成后, 电网智能仿真软件会读取 PSASP 存放在 MySQL 中的计算结果数据, 并将读取到的计算结果进行一定处理, 存储在达梦数据库的数据表中。其中, 读取到的潮流计算结果存储在 REP\_RESULT 表中, 暂态稳定计算结果存储在 REP\_ZWRESULT 表中。

表 1 数据交互涉及的 MySQL 库及其存储信息

Table 1 MySQL database and its storage information

involved in data-exchanging		
数据类型	数据表	存储信息
模型数据	cdb_generat	发电机
	cdb_load	负荷
	cdb_trans_3w	三绕组变压器
输入数据	ls5	发电机
	ls6	负荷
	ls3	变压器
输出数据	lfr_gen_r_23	发电机
	lfr_load_r_23	负荷
	lfr_t3w_r_23	变压器

表 2 数据交互涉及的达梦数据库及其存储信息

Table 2 Damon database and its storage information

involved in data-exchanging		
模式	数据表	存储信息
JXGLCAL_USER	REP_RESULT	潮流计算结果
	REP_ZWRESULT	暂态稳定计算结果

软件系统数据交互过程如图 2 所示。

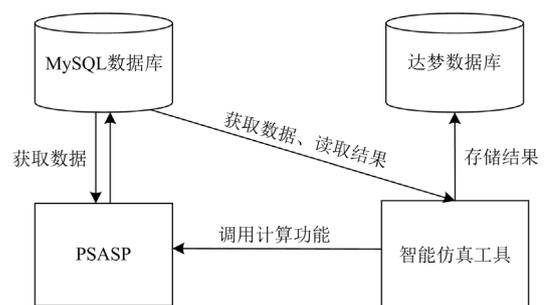


图 2 软件系统数据交互示意图

Fig. 2 Data-exchanging between two software systems

### 2.2 厂站电气接线图自动绘制

厂站电气接线图自动绘制功能主要由 PSASP 模型数据库模块、特征规则库及卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)算法模型模块、可视化图形绘制模块 3 部分构成, 其实现框架如图 3 所示。在 PSASP 模型数据和特征规则库的基础上,

采用基于 CNN 的厂站接线图图元规则识别的实现方法, 自动识别规则和理解图形文件中的图元设备, 最终调用软件绘图函数来实现厂站电气接线图自动绘制, 可视化界面可直观反映各电力元件间的连接关系。

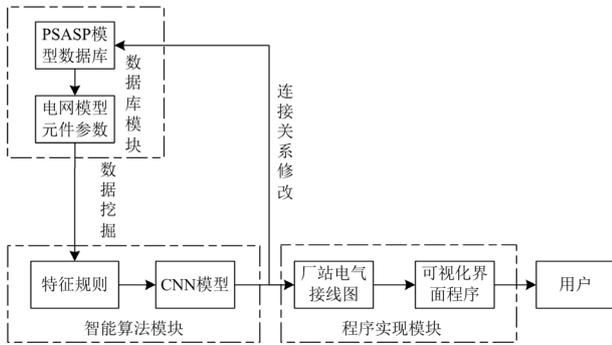


图 3 厂站电气接线图自动绘制实现框架

Fig. 3 Framework of power station wiring auto-graphing

根据用户的不同需求, 该功能可全自动绘制每个厂站或者多个厂站间的电气一次连接图, 并可直接在图上修改元件投退状态、电气参数等模型数据。

其功能示意图如图 4 所示, 可实现基础电气接线图、元件负载率电气接线图、潮流转移比电气接线图 3 类图形的灵活绘制。每种图按区内绘制的厂站数又可分为 3 种。

根据接线图类型, 可用不同颜色显示不同信息。对于基础电气接线图, 采用不同颜色区分不同电压等级元件; 对于负载率电气接线图, 采用不同颜色区分不同负载率的元件, 如用红色表示元件过载。母线的不同颜色代表母线电压的偏移程度。单个厂站负载率电气接线图绘制实例如图 5 所示。

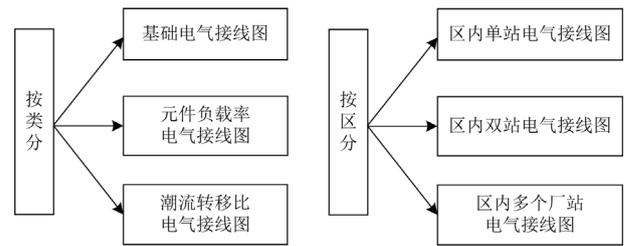


图 4 厂站电气接线图自动绘制功能

Fig. 4 Functionality of power station wiring diagram auto-graphing

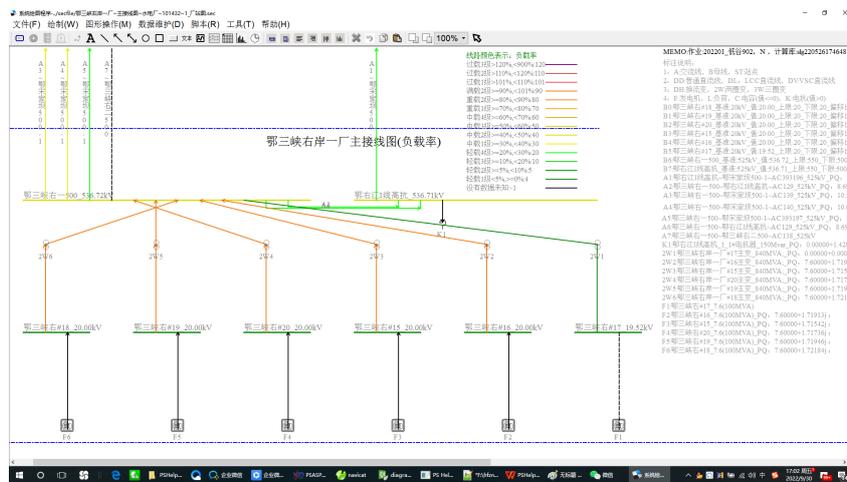


图 5 单个厂站负载率电气接线图实例

Fig. 5 Diagram with capacity-load ratio of single power station

### 2.3 海量运行方式数据自动生成技术

潮流数据是电网仿真分析的基础, 电网安全稳定分析的全面性极大程度取决于所分析的运行方式数量。因此如何高效地生成海量运行方式数据是提高安全稳定分析工作效率的关键技术。电网智能仿真工具从荷、源、网三端着手调整, 实现海量运行方式数据的自动生成, 具体流程如图 6 所示。

基于典型方式场景基础数据, 根据用户计算需求, 按照一定规则依次修改典型潮流作业中的发电机出力、负荷水平或元件投退状态, 修改完毕后自

动分阶段分作业依次进行潮流计算, 形成对应海量运行场景的潮流作业数据。

### 2.4 静态安全自动分析技术

根据用户需求设定研究区域, 选取潮流方式, 确定  $N-1$  开断校核的范围, 调用 PSASP 潮流计算模块, 按照“正常(全接线)+ $N-1$ ”顺序计算, 先进行正常方式的潮流计算, 再逐一进行  $N-1$  (或同杆并架线路  $N-2$ ) 故障计算, 直至完成所有选定元件的  $N-1$  开断计算。潮流计算结果存储在历史数据库中, 可自动筛选出现潮流越限的  $N-1$  作业, 并计

算元件功率越限程度及潮流转移比, 结果展示在软件界面及厂站电气接线图中。具体流程如图 7 所示。

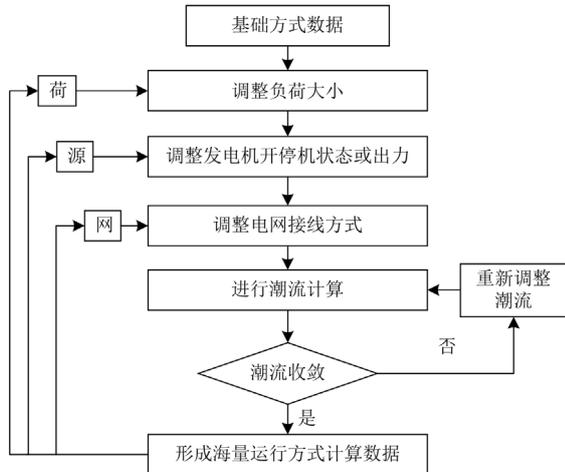


图 6 海量运行方式数据自动生成流程

Fig. 6 Flow chart of automatic data generation for mass power system operational modes

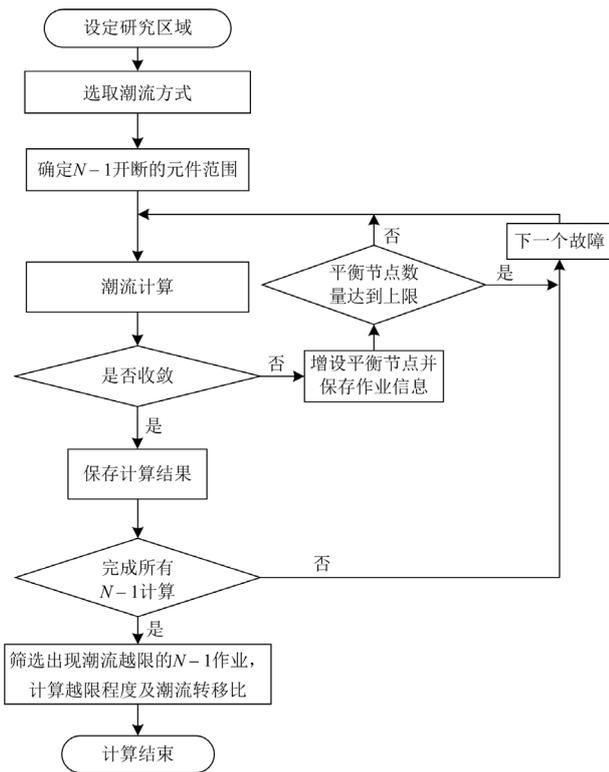


图 7 静态安全自动分析流程

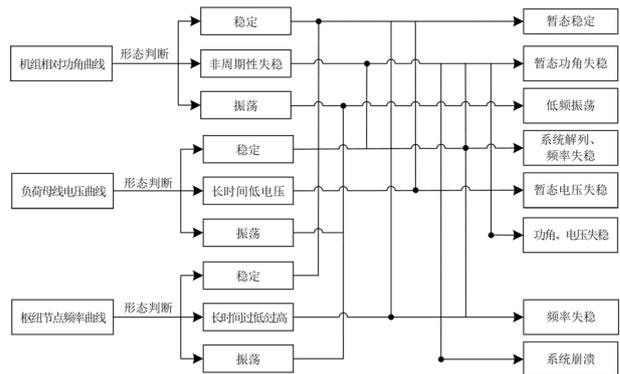
Fig. 7 Flow chart of automatic static security analysis

某些元件 N-1 开断后潮流计算可能不收敛, 原因多为元件开断导致的局部系统有功功率或无功功率不平衡。通过增设平衡节点, 由新的平衡节点分担功率不平衡量可提高潮流收敛性。每次潮流计算

完成时, 若收敛, 软件则自动转储计算结果到历史数据库; 若不收敛, 则根据计算提示信息自动增设平衡节点, 重新进行潮流计算, 直至平衡节点数量达到设置的上限, 并将作业信息保存以使用户进行进一步的详细分析。对于直流单极闭锁等大功率不平衡故障, 不纳入 N-1 开断的元件范围<sup>[25]</sup>。

### 2.5 暂态稳定自动判断技术

智能仿真工具通过调用 PSASP 暂态稳定计算功能开展单个或多个作业的暂态稳定计算, 将结果文件(后缀为 sot)存储到历史数据库中, 并对稳定性进行自动判断, 不仅给出稳定状态的判据结果, 也给出稳定性质的具体描述。根据现行标准中电力系统稳定的通用判据, 基于发电机功角、母线电压、频率等主要指标判断系统是否稳定。对于功角稳定, 区分非周期性失稳和周期性振荡, 并给出失步机群或振荡机群的详细信息; 对于电压稳定, 基于电压稳定长时间低电压形态有别于功角失稳引起的电压振荡形态的特点, 将负荷母线电压长期保持较低水平作为判断的标准; 对于频率稳定, 也将母线频率长期保持过高或过低值作为判断的标准。除了单一稳定形态的识别, 还考虑了功角、电压失稳交织等复杂稳定形态的识别。暂态稳定自动判断功能逻辑框图如图 8 所示。分别对单一功角、电压、频率曲线进行分析, 判据结果为稳定、失稳或振荡三者之一; 再综合功角、电压、频率三者的判据结果, 得到暂态稳定性质的分析结论。对于图 8 未涵盖的功角、电压、频率稳定判据结果组合, 程序将提示无法自动判断, 由工程技术人员具体分析。



注: “+”或“上”表示有效连接, “-”表示跨越。

图 8 暂态稳定自动判断逻辑框图

Fig. 8 Logical block for automatic transient stability judgment

### 2.6 小干扰稳定自动计算技术

目前, PSASP 小干扰计算基于潮流作业进行。根据用户选择的潮流作业, 依次开展线性化和特征值计算, 得到系统振荡模式和振荡模态。用户可筛

选输出与关注区域内机组强相关的机电振荡模式, 并按阻尼由弱至强对振荡模式进行排序, 给出各振荡模式的频率、衰减阻尼、强相关机群等信息。具体流程如图 9 所示。

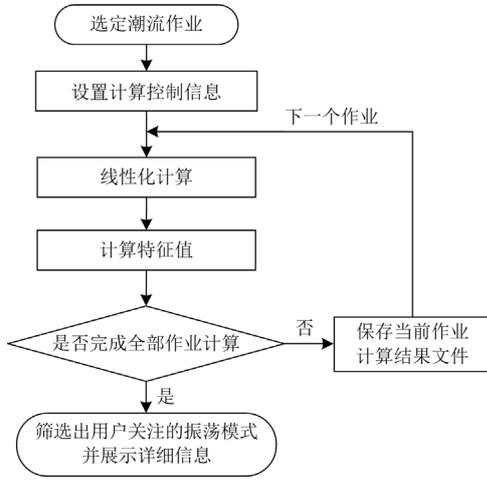


图 9 小干扰稳定自动计算流程

Fig. 9 Flow chart of automatic calculation for the small disturbance stability

### 3 工程应用

将研发的电网智能仿真工具应用在华中电网安全稳定计算工作中。根据未来电网不同规划水平年的边界条件和仿真计算需求, 分 3 个阶段构建未来华中电网智能仿真计算模型, 并形成海量运行场景数据。具体流程如图 10 所示。

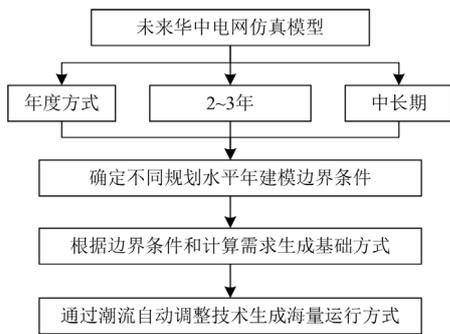


图 10 未来华中电网海量运行场景数据生成过程

Fig. 10 Process of generating massive operation scenario data of Central China power grid in the future

在获得海量运行方式数据的基础上, 利用电网智能仿真工具对华中主网进行安全稳定分析, 可得到电网运行的主要薄弱点。下面以鄂西北外送断面(如图 11 所示)输电能力分析为例说明。鄂西北地区水电资源丰富, 常有“窝电”现象发生。预计宜城电厂、随州电厂等电源投产后, 电力外送需求进

一步增加, 需要对鄂西北外送断面输电能力进行分析。

利用海量运行方式自动生成技术, 得到鄂西北断面不同外送功率下的多个潮流作业, 在此基础上进行静态安全分析和暂态稳定校核。发现鄂西北断面外送功率为 4211 MW 时, 斗樊 I 回 N-1 故障后斗樊 II 回功率达到 2201 MW, 潮流计算结果界面如图 12 所示, 程序自动计算得到斗樊 II 回过载 11.8%。此时对应的 500 kV 鄂西北电网元件负载率电气接线图如图 13 所示, 斗樊 I 回开断(虚线表示), 斗樊 II 回略有超载(红色表示)。

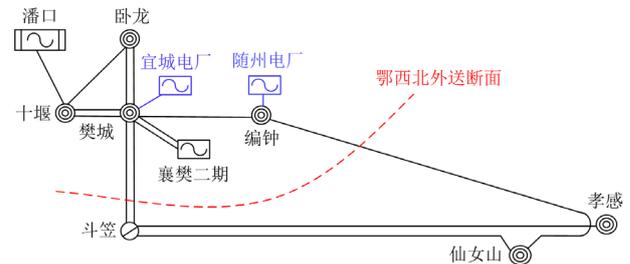


图 11 500 kV 鄂西北电网结构示意图

Fig. 11 Network of 500 kV Northwest Hubei Power Grid



图 12 斗樊 I 回 N-1 故障潮流计算结果界面

Fig. 12 Interface of power flow calculation result under N-1 fault of Doufan line I

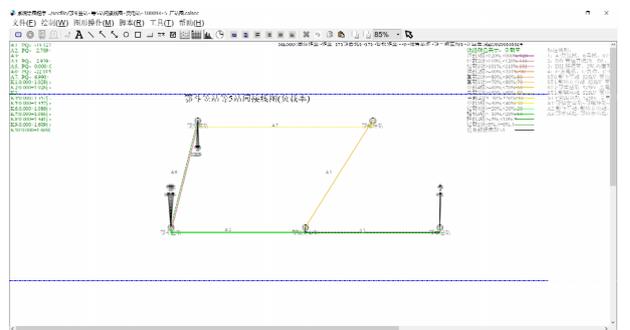


图 13 斗樊 I 回 N-1 故障元件负载率电气接线图

Fig. 13 Wiring diagram of component capacity-load ratio under N-1 fault of Doufan line I

运用智能仿真工具的潮流自动调整功能，得到满足  $N-1$  静态安全约束的鄂西北外送断面功率为 3760 MW。针对该方式进行  $N-1$  故障的暂态稳定校核，发现鄂西北电网近区线路发生  $N-1$  故障后，系统均能保持暂态稳定。其中，智能仿真工具得到的斗樊I回  $N-1$  故障后机组相对功角曲线如图 14 所示。因此，鄂西北外送断面限额为 3760 MW。

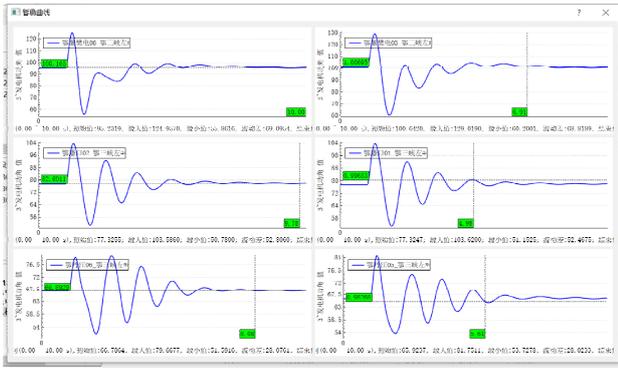


图 14 斗樊I回  $N-1$  故障暂态稳定计算结果界面  
Fig. 14 Interface of transient stability calculation result under  $N-1$  fault of Doufan line I

#### 4 结论

本文从电力系统仿真工具的现状与工程技术人员的实际需求出发，从数据解析与处理、计算功能优化、结果分析与展示、人机界面开发等方面开展工作，在 PSASP 软件基础上开发了电网智能仿真工具。该工具包含厂站接线图自动绘制、海量运行方式数据自动生成、静态安全自动分析等实用化新功能。在华中电网的工程应用表明，该工具可有效提高安全稳定分析工作的效率。

新型电力系统建设和运行面临海量仿真需求，如何采用先进的人工智能与云技术，深度挖掘数据关系价值，实现电网仿真在广度、速度和深度上的不断提升，仍是需要持续探索和研究的方

#### 参考文献

[1] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 66-70.  
TANG Yong. Present situation and development of power system simulation technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 66-70.

[2] 中国电力科学研究院. PSASP 7.7 用户手册[Z]. 北京: 中国电力科学研究院, 2022.

[3] 段建东, 程文姬, 魏朝阳, 等. PSASP2ATP 暂态模型参数转换研究及软件研发[J]. 智慧电力, 2021, 49(1): 102-108.  
DUAN Jiandong, CHENG Wenji, WEI Zhaoyang, et al. Conversion of PSASP2ATP transient model and parameters

and software development[J]. Smart Power, 2021, 49(1): 102-108.

[4] 李亚楼, 张星, 李勇杰, 等. 交直流混联大电网仿真技术现状及面临挑战[J]. 电力建设, 2015, 36(12): 1-8.  
LI Yalou, ZHANG Xing, LI Yongjie, et al. Present situation and challenges of AC/DC hybrid large-scale power grid simulation technology[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(12): 1-8.

[5] 董雪涛, 冯长有, 朱子民, 等. 新型电力系统仿真工具研究初探[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 53-63.  
DONG Xuetao, FENG Changyou, ZHU Zimin, et al. Preliminary study on simulation tool for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 53-63.

[6] 朱金涛, 辛业春. 柔性高压直流输电仿真技术研究方法综述[J]. 智慧电力, 2021, 49(3): 1-11, 94.  
ZHU Jintao, XIN Yechun. Review of research on simulation methods of VSC-HVDC transmission system[J]. Smart Power, 2021, 49(3): 1-11, 94.

[7] 曾泓泰, 郭庆来, 周艳真, 等. 面向电网运行方式计算的不收敛潮流无功调整方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 1-12.  
ZENG Hongtai, GUO Qinglai, ZHOU Yanzhen, et al. Reactive power adjustment method of non-convergent power flow for power system operation mode calculation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 1-12.

[8] 李晓斌. 基于 PSDB 的电网运行方式自动调整技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.  
LI Xiaobin. Research on automatic adjustment technology of power grid operation mode based on PSDB[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.

[9] 王毅, 侯俊贤, 马世英, 等. 用于调度计划安全稳定校核的潮流数据自动整合调整方法[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 100-104.  
WANG Yi, HOU Junxian, MA Shiyong, et al. A method of automatic integration and regulation of power flow data for security and stability check of generation scheduling analysis[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 100-104.

[10] HOU Jinxiu, YU Zhihong, ZHENG Qingping, et al. Tie-line power adjustment method based on proximal policy optimization algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1754.

[11] 摆世彬, 严明辉, 徐伟, 等. 含大规模风电集群电网的在线计算数据生成技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 66-73.  
BAI Shibin, YAN Minghui, XU Wei, et al. An online calculation data generation technology for a power grid

- integrated with a large-scale wind farm[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(3): 66-73.
- [12] 李碧君, 付红军, 胡扬宇, 等. 电网年度运行方式自动优化计算与报告生成系统[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(4): 112-115.  
LI Bijun, FU Hongjun, HU Yangyu, et al. Design and implementation of automatic computation and report generation system for annual power grid operation mode[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(4): 112-115.
- [13] COLE S, BELMANS R. MatDyn, a new Matlab based toolbox for power system dynamic simulation[C] // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 24-28, 2011, Detroit, USA: 1-10.
- [14] MONTENEGRO D, DUGAN R, TAYLOR J, et al. Open-source software projects for advancing the power systems analysis[C] // 2022 Open Source Modelling and Simulation of Energy Systems (OSMSES), April 4-5, 2022, Aachen, Germany: 1-6.
- [15] RUBAN N, SUVOROV A, ANDREEV M, et al. Software and hardware decision support system for operators of electrical power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(5): 3840-3848.
- [16] 李碧君, 徐泰山, 鲍颜红, 等. 具有智能化特征的安全稳定分析与控制决策技术[J]. *电网与清洁能源*, 2012, 28(6): 55-60.  
LI Bijun, XU Taishan, BAO Yanhong, et al. Intelligent safety and stability control and control decision-making support technology[J]. *Power System and Clean Energy*, 2012, 28(6): 55-60.
- [17] 陈国平, 李柏青, 李明节, 等. 新一代特高压交直流电网仿真平台设计方案[J]. *电网技术*, 2021, 45(8): 3228-3237.  
CHEN Guoping, LI Baiqing, LI Mingjie, et al. New generation UHVAC/DC power grid simulation platform design scheme[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(8): 3228-3237.
- [18] 郭崇军, 冯帆, 边宏宇, 等. 基于互联网云平台的大电网智能仿真分析系统设计研究[J]. *智慧电力*, 2017, 45(12): 28-31, 61.  
GUO Chongjun, FENG Fan, BIAN Hongyu, et al. Design and research of intelligent simulation and analysis system for large power grid based on internet cloud platform[J]. *Smart Power*, 2017, 45(12): 28-31, 61.
- [19] 周保荣, 管霖, 武志刚, 等. 新一代电力系统仿真软件的开发框架[J]. *南方电网技术*, 2011, 5(5): 7-12.  
ZHOU Baorong, GUAN Lin, WU Zhigang, et al. The route chart for power system simulation software developing into new generation[J]. *Southern Power System Technology*, 2011, 5(5): 7-12.
- [20] 沉沉, 陈颖, 黄少伟, 等. 新型电力系统仿真应用软件开发理念与发展路径[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(10): 75-86.  
SHEN Chen, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. Design idea and development path of simulation application software for new power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(10): 75-86.
- [21] 汤涌, 姚伟, 王宏志, 等. 电网仿真分析与决策的人工智能方法[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(15): 5384-5406.  
TANG Yong, YAO Wei, WANG Hongzhi, et al. Artificial intelligence techniques for power grid simulation analysis and decision making[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(15): 5384-5406.
- [22] 汪康康, 梅生伟, 魏巍, 等. 基于图卷积网络的快速暂态安全评估方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(1): 43-51.  
WANG Kangkang, MEI Shengwei, WEI Wei, et al. Fast transient security assessment based on graph neural networks[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(1): 43-51.
- [23] REN Chao, XU Yan, ZHANG Yuchen. Post-disturbance transient stability assessment of power systems towards optimal accuracy-speed tradeoff[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(2): 194-203.
- [24] 田芳, 周孝信, 于之虹. 基于支持向量机综合分类模型和关键样本集的电力系统暂态稳定评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(22): 1-8.  
TIAN Fang, ZHOU Xiaoxin, YU Zhihong. Power system transient stability assessment based on comprehensive SVM classification model and key sample set[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(22): 1-8.
- [25] 国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定计算技术规范: GB/T 40581—2021[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 2021.  
Standardization Administration of the People's Republic of China. Calculation specification for power system security and stability: GB/T 40581—2021[S]. Beijing: State Administration for Market Regulation, 2021.

收稿日期: 2023-02-13; 修回日期: 2023-03-22

作者简介:

李 锋(1973—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统规划设计与调度运行; E-mail: lifeng@cc.sgcc.com.cn

王 莹(1990—), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: 329114170@qq.com

(编辑 周金梅)