

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190439

## 计及安全稳定二、三道防线的电网运行风险评估

陈兴华<sup>1</sup>, 李峰<sup>2,3</sup>, 陈睿<sup>1</sup>, 魏宏<sup>1</sup>, 徐雄峰<sup>2,3</sup>, 杨文佳<sup>1</sup>, 肖柱<sup>2,3</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 3. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211106)

**摘要:** 为满足电网运行风险“实时分析、预先调控”的安全性要求, 提出计及安全稳定二、三道防线的电网运行风险评估方案, 解决安全自动装置(安自装置)执行效果与电网实时运行缺乏互动的问题。该方案基于可扩展标记语言 XML 描述安自装置当值控制策略及定值, 在线实时传送至在线动态安全评估系统。在线动态安全评估系统按启动逻辑、动作逻辑和控制设备三元素建立安自装置控制策略模型后, 结合电网实时运行数据, 评估安自装置当值控制策略在电网预想故障场景下能否保证电网安全稳定运行。进一步根据 599 号令等有关条款, 统计安自装置动作切除设备所造成的电力安全事件等级, 实现安自装置动作后果的风险评估。该方案首次在广东电网实际应用, 效果表明该方案能够计及安全二、三道防线安自装置当值控制策略的影响, 提升在线动态安全评估结果的实时性和准确性。

**关键词:** 安全自动装置; 控制策略; 建模; 动态仿真; 风险评估

### Risk assessment of power grid operation considering second and third defense line of security and stability

CHEN Xinghua<sup>1</sup>, LI Feng<sup>2,3</sup>, CHEN Rui<sup>1</sup>, WEI Hong<sup>1</sup>, XU Xiong-feng<sup>2,3</sup>, YANG Wen-jia<sup>1</sup>, XIAO Zhu<sup>2,3</sup>

(1. Guangdong Power Dispatching Center, Guangzhou 510600, China; 2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 3. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

**Abstract:** In order to meet the power grid operation safety requirements of "real-time analysis and pre-regulation", a power grid operation risk assessment scheme considering second and third defense lines of security and stability is proposed to solve the security problem from a lack of real-time interaction between automatic-safety device's control and power grid operation. In this scheme, on duty control strategy and fixed value of automatic-safety device is described with XML language, and it is transmitted to the online dynamic safety assessment system in real time. The online dynamic safety assessment system establishes the control strategy model of the automatic-safety device based on the starting logic, action logic and control equipment, and then evaluates whether the on duty control strategy of the automatic-safety device can guarantee the safe and stable operation of the power grid under the predicted failure scenario based on the real-time operation data of the power grid. The online dynamic safety assessment system further calculates the level of power safety accidents caused by the action of the automatic-safety device according to the relevant provisions such as decree No. 599. Finally, the risk assessment of the automatic-safety device action consequence is realized. The scheme is applied in Guangdong Power Grid for the first time. The effect shows that the scheme can take into account the actual impact of second and third defense lines' on duty control strategy and improve the accuracy of the online dynamic security assessment results.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (ZDKJXM20180078).

**Key words:** automatic-safety device; control strategy; modeling; dynamic simulation; risk assessment

## 0 引言

作为保障电网安全稳定运行的第二、三道防线,

安全自动装置(安自装置)在电网中得到广泛应用, 随着应用规模不断扩大以及自身控制策略的复杂性, “离线策略、在线匹配”模式面临巨大挑战。离线制定的控制策略能否跟踪、适应交直流混联大电网运行方式的变化, 安自装置动作后是否会造成不良后果等, 关乎电网安全稳定及供电可靠。2011年,

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目资助 (ZDKJXM20180078)

国务院第 599 号令《电力安全事故应急处置和调查处理条例》的颁布<sup>[1]</sup>, 对电网或安自装置造成的减供负荷和损失用户数提出了严格的考核要求。为此, 在当前在线动态安全评估系统中导入安自装置集中管理系统实时采集的安自装置当值控制策略, 实现更加精准的电网实时运行风险评估势在必行<sup>[2-5]</sup>。

在线动态安全评估系统是电网实时安全稳定评估的基础支撑软件。但是目前计算中仅考虑了低频低压减载、发电机高低周保护等一些简化模型, 尚缺乏对安自装置系统、准确地建模<sup>[6]</sup>。广东中调前期为实现计及安全稳定二、三道防线的电网运行风险功能提供了技术条件, 在 2010 年率先开展了安自装置的标准化设计, 对线路/主变 N-2 故障切机/切负荷、线路/主变过载切机/切负荷、低频低压减载策略等开展了标准化改造, 为安自装置控制策略统一建模提供了逻辑基础。而后, 广东中调建设完成安自装置集中管理系统, 实现对装置电气量、开入、状态量以及定值等多类信息的统一采集和集中监视, 为实时跟踪安自装置的当值控制策略变化提供了信息基础。

本文基于广东一体化电网运行智能系统(OS2), 整合在线动态安全评估系统与安自装置集中管理系统<sup>[7-13]</sup>, 提出计及安全稳定二、三道防线当值控制策略的电网实时安全稳定评估总体方案。利用安自装置集中管理系统采集的安自装置实时运行数据和策略定值, 建立安自装置当值控制策略模型, 利用在线动态安全评估系统进行计及安全自装置控制策略的时域仿真, 并根据仿真计算结果, 评估故障后电网的安全稳定性及故障所造成的电力安全事故事件等级。若风险评估揭示安自装置动作后无法满足电网安全稳定要求或损失负荷满足事故事件等级标, 将实时警示并辅助调度员进行预调预控, 如优化调整有关安自装置定值或状态(更新控制策略定值、投退允许压板等), 实现安自装置控制策略与运行电网的实时互动。

### 1 总体框架设计

计及安全稳定二、三道防线的电网运行风险评估总体框架如图 1 所示。

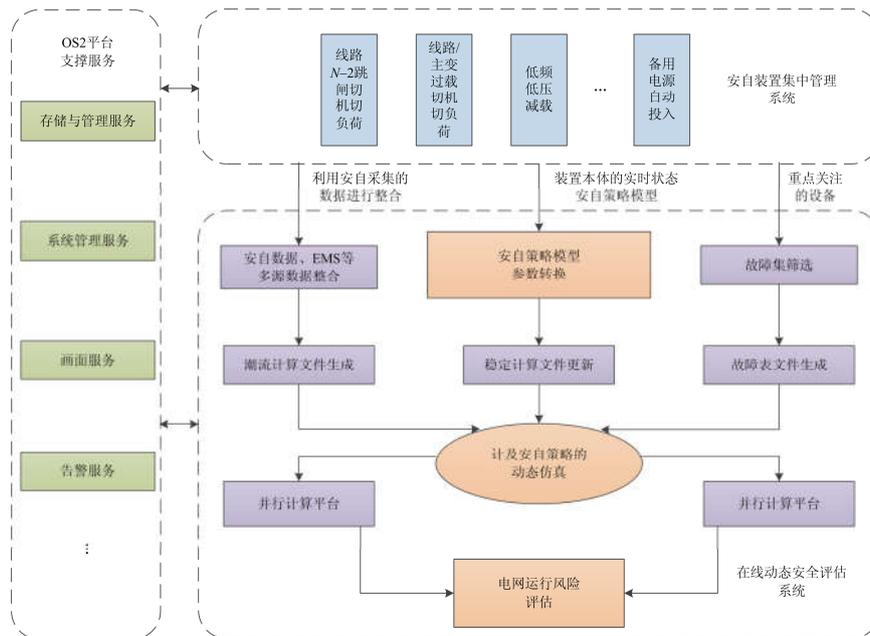


图 1 考虑安自装置控制策略的电网实时风险评估框架

Fig. 1 Power grid real-time risk prevention and control frame considering automation equipment control strategy

#### 1.1 OS2 平台支撑服务

方案的总体功能实现由在线动态安全评估系统和安自装置集中管理系统共同完成。在线动态安全评估系统和安自装置集中管理系统作为应用功能模块基于 OS2 平台一体化运行, 与其他应用功能模块共享实时数据库和商业数据库。OS2 平台为实现本

文功能提供的支撑服务, 主要包括: 存储与管理服务、系统管理服务、画面服务、告警服务。例如可通过 OS2 平台的画面服务展示计及安全稳定二、三道防线的电网运行风险评估的可视化信息。

#### 1.2 安自装置集中管理系统

安自装置集中管理系统将实时采集的装置信息

写入 OS2 平台数据库, 并提供给在线动态安全评估系统。其提供的信息主要有三类, 一类是负荷线路和机组等的有功信息, 与 EMS、WAMS 等数据源互补, 建立更加准确的电网实时运行状态; 第二类是装置本体的实时状态, 包含投退状态、闭锁状态、压板状态等; 第三类是装置的定值单文件, 包含重点考察的故障集, 启动条件参数、动作条件参数、切除设备优先级列表等。安自装置集中管理系统还负责根据装置控制策略功能(逻辑关系)和定值单文件建立各个安自装置的控制策略模型。

### 1.3 在线动态安全评估系统

在线动态安全评估系统包含多源信息整合模块、安自策略模型参数转换模块、故障集筛选模块、计及安自装置控制策略的动态仿真模块以及电网运行风险评估模块。

多源信息整合模块周期性获取 EMS 状态估计数据、安自装置采集数据等多源信息, 通过对安自装置采集数据进行合理性检查、量测质量码判定、与状态估计数据模型匹配检查, 利用安自装置实测数据精确替换部分状态估计数据, 生成仿真计算模块使用的潮流计算输入文件。

安自策略模型参数转换模块应用安自装置本体的实时状态和安自装置的控制策略模型, 识别出装置的当前控制策略, 并转换为在线动态安全评估系统能够识别的策略输入参数, 同时将控制策略参数加入到稳定计算文件中。

故障集筛选模块生成仿真计算模块使用的故障表输入文件, 预想故障的选择主要针对的是电力系统安全稳定导则规定的第二级和第三级安全稳定标准。

计及安自装置控制策略的动态仿真模块读取安自策略模型参数转换模块输出的安自策略模型参数, 在电网仿真计算过程中加入了判断安自装置 N-2 故障、过载、低频、低压等不同控制策略的启动和动作逻辑, 并将满足动作条件的安自装置的切机切负荷控制措施作用到电网的动态特性中。在计算时将故障集形成不同的计算任务, 提交集群系统进行并行计算, 提高计算速度。仿真计算的准确性一方面依赖于电网状态估计数据的准确程度, 另一方面依赖于安自装置模型的精确程度。

电网运行风险评估模块针对电力系统安全稳定导则规定的第二级和第三级安全稳定标准预想故障, 评估安全自动装置动作后电网是否恢复安全稳定运行, 并根据国务院第 599 号令《电力安全事故应急处置和调查处理条例》和《中国南方电网有限责任公司电力安全事件调查规程》中的相应条款评

估安自装置动作切除设备所造成的电力安全事件等级。如果评估结果显示安全自动装置动作后电网不能恢复安全稳定运行或者安自装置动作损失的总负荷达到某个事件等级条款, 则给出告警信息提醒调度员进行干预。

## 2 关键技术

### 2.1 装置定值的 XML 格式化描述

安自装置集中管理系统不仅需要显示安自装置的定值, 还需要基于装置当前的定值单文件解析出启动条件参数、动作条件参数、切除设备优先级列表等关键定值信息, 从而建立各个安自装置的控制策略模型。对安自装置上送的定值单使用可扩展标记语言 XML 进行统一规范。可扩展标记语言 XML 是一种允许用户对自己的标记语言进行定义的源语言, 它提供统一的方法来描述和交换独立于应用程序的结构化数据。采用 XML 标准格式对安自装置定值单文件进行描述, 全部定值放置于 XML 元素的属性之中, 通过根元素、子元素构成的树形结构, 最终构成多层次的定值描述体系。同时通过对每种子元素定义属性特征关键字, 可实现对每个定值子元素物理含义的识别。XML 描述方法不仅可以在安自装置集中管理系统中对装置定值按 EXCEL 表格方式进行显示, 还便于软件解析定值单文件的内容。附录 A 给出了广东电网罗洞变电站相关策略定值的 XML 格式文档片段。

### 2.2 安自装置控制策略模型参数转换

基于安自装置集中管理系统生成的各个安自装置的控制策略模型, 综合安自装置运行状态、允切压板、定值, 将安自装置控制策略模型参数转换为在线动态安全评估系统能够识别的输入文件(下文简称 S 文件), 输入文件格式按照启动逻辑、动作逻辑和控制设备三元素进行组织<sup>[14-16]</sup>。安自装置控制策略模型参数转换模块首先从安自装置集中管理系统中读取安自装置的投退状态, 如果为非投入, 则不输出装置对应的 S 文件, 如果为投入, 则进一步读取安自装置的控制策略模型, 将控制策略类型、定值以及执行措施填入 S 文件, 其中执行措施包含可切除设备(包括负荷、发电机组、线路等)的优先级定值和可切除设备的允切压板实时状态。

以广东电网 220 kV 线路过载切负荷策略为例说明如下。

启动逻辑, 同时满足以下 4 个条件, 延时 0.1 s 后, 装置过载启动: ① 线路检修压板退出; ② 线路的过载控制字整定为 1; ③ 线路潮流方向满足指定要求; ④ 线路或主变电流  $\geq$  过载启动电流定值(固

化为过载动作电流定值-50 A)。

动作逻辑,同时满足以下3个条件,并达到动作延时,装置过载动作:①线路过载启动;②线路电流≥过载动作电流定值;③线路功率≥过载动作功率定值。需切量=线路或主变过载动作时功率-线路或主变动作功率定值,此逻辑最多重复动作3次,3次后若仍过载,装置将不再动作。每次动作的需切量独立计算,不扣减前一次的过切量。若多个元件同时过载,装置只考虑最先满足动作条件的元件出口,每次过载动作后,所有元件过载延时计数重新清零。

控制设备,按实际负荷线路建模,设定切除优先级,执行时,在最大允许负荷切除量范围内,根据需切量,按优先级依次切除对应负荷。

将以上启动逻辑、动作逻辑和控制设备三元素组织为与机电暂态仿真程序 FASTEST<sup>[17]</sup>兼容的稳定计算格式文件(S文件),完成实时策略模型转换。

### 2.3 计及安自装置控制策略的动态仿真

电力系统的暂态过程方程可以统一用微分-代数方程组描述为

$$\dot{x} = f(x, y) \quad x(t_0) = x_0 \quad (1)$$

$$0 = g(x, y) \quad y(t_0) = y_0 \quad (2)$$

式中:  $x$  是由各发电机及其调节系统的状态变量组成的向量;  $y$  是有关代数变量向量;  $t_0$  是初始时刻;  $x_0$  和  $y_0$  分别为  $x$  和  $y$  的初始值。

上述微分代数方程一般采用隐式梯形法进行求解,微分方程和代数方程交替求解,每一步长需要多次迭代计算。

在每一积分步长迭代收敛后,判断电网中部署的安自装置是否满足各种控制策略中的启动条件,如满足则启动;对于已经启动的安自装置,则进一步判断是否满足动作条件,如满足则动作;通过修改系统网络导纳阵和修改节点注入电流方式执行切除线路、切除发电机、切除负荷等操作,实现电网预想故障后安自装置的动作仿真。

本文方案中的动态仿真程序以 FASTEST 为计算内核<sup>[17]</sup>,FASTEST 能够系统全面地快速定量评估电网的暂态功角稳定性、暂态电压安全性、暂态频率安全性<sup>[18-19]</sup>。计算模型涵盖各阶同步电机模型、励磁系统模型、调速系统模型、动态和静态负荷模型、风电和光伏发电新能源模型、直流输电模型以及各类 FACTS 模型。为适应本文方案重点开发建立了详细的安自装置仿真模型。相比较目前通用的机电暂态仿真软件中的安自控制策略简化模型,本文采用的安自策略模型则更加详细,更加适合计及

装置策略的精细化仿真,例如考虑到电压或者频率变化率的启动条件,考虑到装置闭锁和重启动情况,还考虑到实际切负荷存在最小欠切或者最小过切的逻辑等等。

### 2.4 基于仿真结果的电网运行风险评估<sup>[20-22]</sup>

动态仿真结束后的电网运行风险评估分为事后电网运行状态风险和事故事件等级风险评估,评估过程如图2所示。

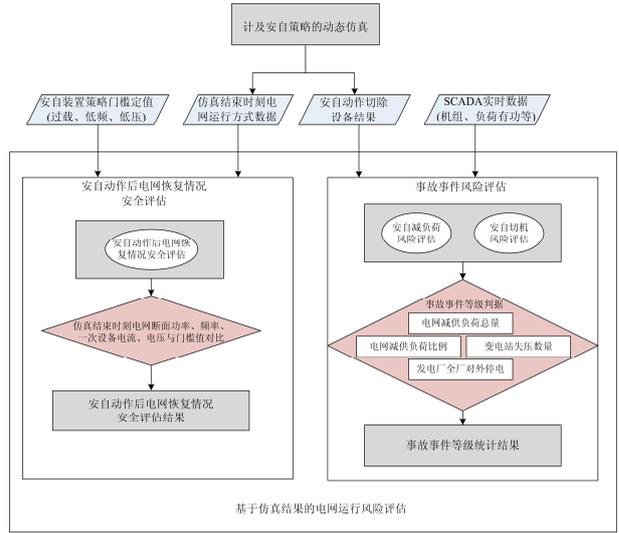


图2 基于仿真结果后的电网运行风险评估

Fig. 2 Risk assessment of power grid operation based on simulation results

一方面可将电网仿真计算结束时刻的电网频率、断面功率、线路潮流、母线电压等量测数据与安自装置 N-2 故障、过载、低频、低压等不同控制策略启动/动作逻辑中的门槛定值进行比较,评估安全自动装置动作后电网是否恢复安全稳定运行,例如评估安自装置动作后过载的线路潮流是否不再过载,电网的频率、电压是否恢复到正常水平,如果评估结果显示安全自动装置动作后电网不能恢复安全稳定运行,进行告警提醒调度运行人员注意。

另一方面,根据电网动态过程仿真计算结果可统计故障后不同类型安自装置连锁动作切除的机组和负荷损失情况,根据国务院第 599 号令《电力安全事故应急处置和调查处理条例》和《中国南方电网有限责任公司电力事故事件调查规程》评估安自装置动作切除设备所造成的电力安全事故事件等级,如果达到某个事故事件等级条款,自动进行告警。当达到多个条款的事故事件等级时,则选取其中最严重事故事件等级条款告警。具体判据如图3所示,图中,  $PCT$  表示减供负荷比例,  $P$  表示减供

负荷量,  $N$  表示变电站失压数量,  $C$  表示发电厂装机容量, all 表示广东电网, area 表示分区, user 表示用户站,  $g$  表示机组。

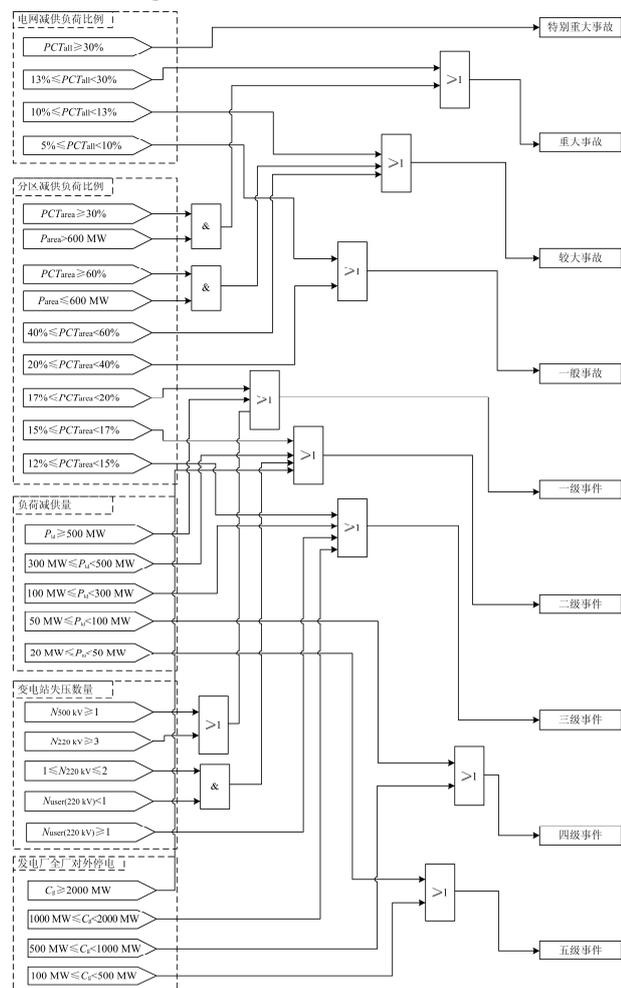


图 3 事故事件等级判据

Fig. 3 Criteria of the accident event level

例如, 针对广东 19 个地区电网减供负荷比例这一条款, 首先建立减供负荷比例区间与事故等级的关系数据库, 基于动态仿真输出结果按分区统计出发生预想故障时安自装置实际会切除的各分区负荷量, 再从 OS2 平台获取故障时刻各分区电网的统调负荷量, 计算得到减供负荷的比例, 进一步根据数据库中的减供负荷比例区间与事故等级的对应关系计算出安自装置切除负荷所造成的事故事件等级, 发送该事故事件告警信息。由于 599 号令和南网事故事件调查规程中提及的评估条款众多, 受限目前的条件, 本文提及的风险评估方案所支持的条款主要有电网减供负荷总量、电网减供负荷比例、变电站失压数量、发电厂全厂对外停电等。

### 3 实例分析

计及安自装置控制策略后, 在线动态安全评估系统仿真计算的准确性得到极大提升。本文选取广东罗洞环网某时刻的运行方式数据加以说明, 定义该时刻断面为时刻 A, 作为仿真开始时的初始断面, 时刻 A 罗洞环网中除罗文甲线处于检修状态外其余线路均处于投运状态, 如图 4, 罗文乙线初始电流为 632.4 A, 过载限值为 1 310 A。罗洞变电站部署有控制站装置, 在丹桂、文华、雷岗、平胜变电站内部署有切负荷执行站装置。罗洞控制站装置实时检测罗丹双回线故障, 若发生罗丹双回线故障, 根据稳控策略向丹桂、文华、雷岗、平胜站内的切负荷执行站装置发送切负荷命令, 切负荷执行站装置接收命令后切除本站内的负荷。

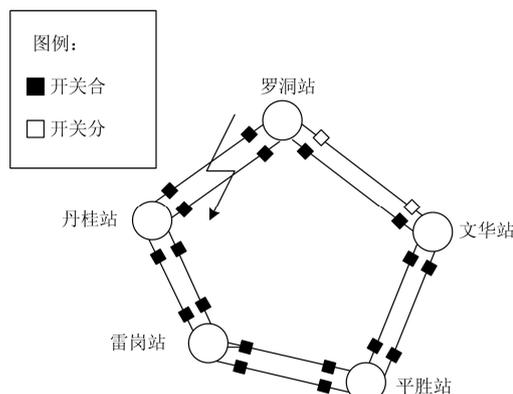


图 4 时刻 A 广东罗洞环网架结构

Fig. 4 Ring network structure of Guangdong Luodong at moment A

以 220 kV 罗丹双回线预想发生  $N-2$  故障导致罗洞变电站安全稳定控制装置动作为例, 在广东中调在线动态安全评估系统中按常规方法和本文提出的方法分别进行仿真计算, 常规方法使用简化的离线控制策略, 本文所提方法采用实时采集的安自装置控制策略。

实施计及安全稳定二、三道防线的电网运行风险评估具体过程为, 基于安自装置集中管理系统实时采集罗洞变电站安全自动装置当值策略, 以 XML 格式化文档形式(详见附录 A), 提供给在线动态安全评估系统, 在线动态安全评估系统完成安自装置控制策略模型参数转换后(详见 2.2 节), 形成在线动态评估所需的 S 文件, 结合 EMS 提供的电网实时运行状态数据和所设置的考察故障(220 kV 罗丹双回线预想  $N-2$  故障)进行在线动态仿真计算, 根据计算结果, 统计故障后不同类型安自装置连锁动作

切除的机组和负荷损失情况，对照相关条款，评估事故等级及风险。

两种方法分别进行仿真计算，结果如表 1 所示。两种方法计算结果不同。采用常规方法仿真，罗丹双回 N-2 故障导致罗洞站控制装置动作切除负荷后罗文乙线电流降为 1 150.7 A，未达到过载电流门槛限值，因此文华站切负荷执行站装置过载策略不会动作。采用本文的方法仿真，罗洞站控制装置动作切除负荷后罗文乙线电流降为 1 313.8 A，文华站切负荷执行站装置过载策略会发生动作。造成差异主要原因是常规方法假设 N-2 故障情况下实际切除负

荷量等于需切负荷量，不考虑切负荷执行站装置实际的负荷线路远切优先级定值、负荷线路允切压板实时状态，而负荷线路远切优先级定值被设置为 0、负荷线路允切压板未投入都可能导致负荷不可切，控制站装置实际能够切除的负荷量不能满足需切量。最后，电网运行风险评估软件对本次故障所有安自装置切除的负荷按电网减供负荷总量和电网减供负荷比例分别进行统计，评估出的事故事件等级结果未达到事故等级，但达到了《中国南方电网有限责任公司电力事故事件调查规程》中规定的减供负荷 100 MW 以上 300 MW 以下的三级事件标准。

表 1 采用不同方法的仿真计算结果对比

Table 1 Comparison of simulation results using different methods

仿真方法	故障需切负荷量/MW	执行站	执行站切除负荷量/MW	切除负荷后罗文乙线电流/A	切除负荷后文华变电站切负荷执行站装置过载策略是否动作	本次故障所有安自装置切除负荷总量/MW	事故事件等级	
常规方法	268	丹桂站	68	1 150.7	否	268	三级事件	
		文华站	69					总计
		平胜站	65					268
		雷岗站	66					
本文提出的方法	268	丹桂站	68	1 313.8	是	291	三级事件	
		文华站	35					总计
		平胜站	30					169
		雷岗站	36					

两种方法分别进行仿真计算得到的罗文乙线电流仿真曲线如图 5、图 6 所示。常规仿真方法下罗丹双回 N-2 故障后罗洞变电站安全稳定控制装置采取远方切除负荷措施后，罗文乙线电流直接回到了过载电流门槛值之下。而采用本文的仿真方法得到的结果是由于罗洞变电站安全稳定控制装置远切负荷不足，罗文乙线电流还在过载电流门槛值之上，导致故障 6 s 后文华站切负荷执行站装置判出罗文乙线过载，从而采取过载切负荷措施，切除负荷后罗文乙线电流低于过载电流门槛限值，不再过载。

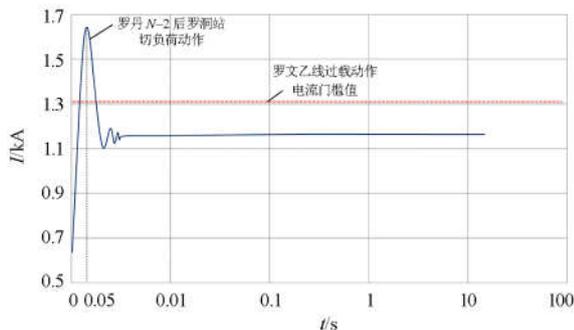


图 5 采用常规方法仿真后的罗文乙线电流仿真曲线  
Fig. 5 Current simulation curve of Luowen Yi line is simulated by conventional method

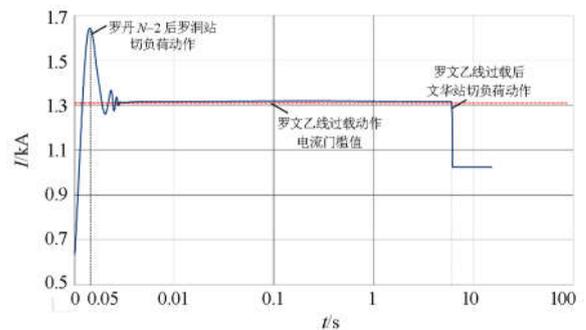


图 6 采用本文方法仿真后的罗文乙线电流仿真曲线  
Fig. 6 Simulation curve of Luowen Yi line current is simulated by the method in this paper

常规仿真方法下采用简化的安自装置控制策略会导致仿真结果出现偏差，而使用本文方法，评估结果根据安自装置当值控制策略实时计算得出，反映了当时电网和安自装置的实际运行状态，结论更为准确。

#### 4 结论

本文提出的计及安全稳定二、三道防线的电网运行风险评估方案，将安自装置集中管理与在线动态安全评估相结合，实现了电网动态过程的精细化

计算,更真实地逼近电网一二次动态特性。基于本方案开发的软件已经在广东中调一体化电网运行智能系统(OS2)上部署并试运行,目前每5 min进行一次仿真计算。试运行结果表明,在定义安自装置策略模型以及实际装置关注的故障集后,能够自动完成电网状态估计数据与稳控策略模型的关联,实现对安自装置动作后电网安全稳定情况的评估。在南方电网范围内,率先实现了计及安自装置控制策略的实时仿真计算和对安自装置动作风险的评估,提升了调度运行人员对安自装置控制策略的实时掌控能力。

后续研究将继续就安自装置采集环节效率对实时仿真计算的影响、直流系统稳控措施建模与仿真、网-省-地安自装置控制策略协同仿真分析与控制技术方向进行拓展和优化,进一步指导交直流大电网安全稳定控制策略的分析与研究,促进安自装置的布点优化。

## 附录 A

```
<?xml version="1.0" encoding="gbk"?>
<SetDoc lbl="罗洞变电站运行定值单" list_no="00001">
  <Worksheet lbl="基本定值" id="WS1">
    <Table lbl="基本定值" id="WS1T1" row="10" col="2">
      <Cell pos="0,0" lbl="定值名称"/>
      <Cell pos="0,1" lbl="定值"/>
      <Cell pos="1,0" lbl="500kV主变投停是否用HWJ"/>
      <Cell pos="1,1" sa="WK_500_SET_001" tp="i" ran="0,1,1" ut="" val="0"/>
      <Cell pos="2,0" lbl="变高投运电流"/>
      <Cell pos="2,1" sa="WK_500_SET_002" tp="i" ran="0,9999,1" ut="A" val="150"/>
      <Cell pos="3,0" lbl="变高投运功率"/>
      <Cell pos="3,1" sa="WK_500_SET_003" tp="i" ran="0,9999,1" ut="MW" val="40"/>
      <Cell pos="4,0" lbl="220kV线路投运电流"/>
      <Cell pos="4,1" sa="WK_500_SET_004" tp="i" ran="0,9999,1" ut="A" val="200"/>
      <Cell pos="5,0" lbl="220kV线路投运功率"/>
      <Cell pos="5,1" sa="WK_500_SET_005" tp="i" ran="0,9999,1" ut="MW" val="50"/>
      <Cell pos="6,0" lbl="220kV线路电流启动"/>
      <Cell pos="6,1" sa="WK_500_SET_006" tp="i" ran="0,9999,1" ut="A" val="9999"/>
      <Cell pos="7,0" lbl="220kV线路功率启动"/>
      <Cell pos="7,1" sa="WK_500_SET_007" tp="i" ran="0,9999,1" ut="MW" val="9999"/>
      <Cell pos="8,0" lbl="220kV线路跳前功率"/>
      <Cell pos="8,1" sa="WK_500_SET_008" tp="i" ran="0,9999,1" ut="MW" val="9999"/>
      <Cell pos="9,0" lbl="220kV线路相继跳闸时间间隔Tj"/>
      <Cell pos="9,1" sa="WK_500_SET_009" tp="l" ran="5,9999,1" ut="s" val="5"/>
    </Table>
  </Worksheet>
  <Remark/></SetDoc>
</1-EED081A6-->
```

图 A 罗洞变电站相关策略定值的 XML 格式文档片段

Fig. A The XML document fragment of Luodong substation strategy setting value

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院. 电力安全事故应急处置和调查处理条例[EB/OL]. [2011-07-15]. [http://www.gov.cn/jzwgk/2011-07/15/content\\_1906887.htm](http://www.gov.cn/jzwgk/2011-07/15/content_1906887.htm).
- [2] 田芳, 黄彦浩, 史东宇, 等. 电力系统仿真分析技术的发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2151-2163.  
TIAN Fang, HUANG Yanhao, SHI Dongyu, et al. Developing trend of power system simulation and analysis technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2151-2163.
- [3] 王轶禹, 王晶, 冯长有, 等. 电网系统保护在线监视研究及典型应用[J]. 电力工程技术, 2019, 38(5): 63-70.  
WANG Yiyu, WANG Jing, FENG Changyou, et al. Online monitoring for large power system protection and its optimization strategy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(5): 63-70.
- [4] 郭琦, 夏尚学, 朱益华, 等. 大电网大规模稳控系统广域测试接口装置的设计与应用[J]. 电力工程技术, 2019, 38(3): 74-79.  
GUO Qi, XIA Shangxue, ZHU Yihua, et al. Design and application of interface device for wide area remote testing of large scale power system security and stability control system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(3): 74-79.
- [5] 马益平, 王吉庆, 郭高鹏, 等. 基于响应的防电压失稳在线切负荷综合控制策略[J]. 广东电力, 2019, 32(5): 67-72.  
MA Yiping, WANG Jiqing, GUO Gaopeng, et al. Integrated online load shedding control strategy for preventing voltage instability based on response[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(5): 67-72.
- [6] 吴国旻, 宋新立, 汤涌, 等. 电力系统动态仿真中的安全稳定控制系统建模[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 71-75.  
WU Guoyang, SONG Xinli, TANG Yong, et al. Modeling of security and stability control system for power system dynamic simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 71-75.
- [7] 乔亮, 杨丽, 郑亮, 等. 地区电网在线安全稳定预警与辅助决策系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 164-169.  
QIAO Liang, YANG Li, ZHENG Liang, et al. On-line security and stability analysis with pre-alarm and decision-making supporting system for regional power grids[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 164-169.
- [8] 方勇杰, 鲍颜红, 徐伟, 等. 电力系统安全稳定预防控制在线计算方法的评述[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 199-207.  
FANG Yongjie, BAO Yanhong, XU Wei, et al. Review of online calculation methods of preventive control for power system security and stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 199-207.
- [9] 徐泰山, 许剑冰, 鲍颜红, 等. 互联电网预防控制和紧急控制在线预决策系统[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 1-4.  
XU Taishan, XU Jianbing, BAO Yanhong, et al. On-line pre-decision based preventive and emergency control

system for interconnected power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 1-4.

[10] 李碧君, 许剑冰, 徐泰山, 等. 大电网安全稳定综合协调防御的工程应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 25-30.  
LI Bijun, XU Jianbing, XU Taishan, et al. Engineering application of integrated and coordinated defense technology of large power system security and stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 25-30.

[11] 吴国炳, 王阳, 杨银国, 等. 安全稳定控制系统管理主站的功能设计与开发[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 118-122.  
WU Guobing, WANG Yang, YANG Yinguo, et al. Management station design and development of security-stability control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 118-122.

[12] 罗剑波, 董希建, 崔晓丹, 等. 关于大型安全稳定控制系统可靠性研究的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 65-72.  
LUO Jianbo, DONG Xijian, CUI Xiaodan, et al. Discussion on reliability of large scale security and stability control system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 65-72.

[13] 王昊昊, 徐泰山, 马彦宏, 等. 计及多类型电源协调的有功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 167-175.  
WANG Haohao, XU Taishan, MA Yanhong, et al. A novel active power control strategy considering multi-resource coordination[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 167-175.

[14] 汪马翔, 许剑冰, 徐泰山, 等. 基于结构化模型驱动的稳控装置动作模拟仿真方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, 41(9): 74-78.  
WANG Maxiang, XU Jianbing, XU Taishan, et al. Simulation method of security-stability-control-device base on structural model driven[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2011, 41(9): 74-78.

[15] 钱海, 邱金辉, 张道农, 等. 继电保护信息语义智能识别算法的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 83-88.  
QIAN Hai, QIU Jinhui, ZHANG Daonong, et al. Research and application of semantic intelligent recognition algorithm for relay protection information[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 83-88.

[16] GOPAKUMAR P, MALLIKAJUNA B, REDDY M J B, et al. Remote monitoring system for real time detection and classification of transmission line faults in a power grid using PMU measurements[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-018-0089-x.

[17] 薛禹胜. EEAC 和 FASTEST[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(9): 25-30, 37.  
XUE Yusheng. EEAC and FASTEST[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(9): 25-30, 37.

[18] 薛禹胜, 徐泰山, 刘兵, 等. 暂态电压稳定性及电压跌落可接受性[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(14): 4-8.  
XUE Yusheng, XU Taishan, LIU Bing, et al. Quantitative assessments for transient voltage security[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(14): 4-8.

[19] 徐泰山, 薛禹胜. 暂态频率偏移可接受性的定量分析[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(19): 7-10.  
XU Taishan, XUE Yusheng. Quantitative assessments for transient frequency deviation acceptability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(19): 7-10.

[20] 李碧君, 方勇杰, 徐泰山. 关于电网运行安全风险在线评估的评述[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 171-177.  
LI Bijun, FANG Yongjie, XU Taishan. Review on online operational security risk assessment of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 171-177.

[21] 徐泰山, 李峰, 张建新, 等. 各类紧急减负荷控制的在线风险评估和协调决策方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 91-97.  
XU Taishan, LI Feng, ZHANG Jianxin, et al. Online risk assessment and coordinated decision scheme for emergency load shedding control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 91-97.

[22] 卢艺, 卢苑, 何晓峰, 等. 电网风险量化评估方法与管控实践[J]. 广东电力, 2018, 31(5): 49-55.  
LU Yi, LU Yuan, HE Xiaofeng, et al. Risk quantification assessment method and management control practice of power grid[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(5): 49-55.

收稿日期: 2019-04-21; 修回日期: 2019-06-12

作者简介:

陈兴华(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统运行方式和稳定控制; E-mail: soulchen@126.com

李峰(1981—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: lifeng@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)