

在线安全分析系统在安徽电网中的应用

在线安全分析已成为安徽电网调控实时运行业务的核心应用，介绍了在线安全分析系统在安徽电网中的应用模式，并详细阐述了不同模式下的应用功能。通过实际运行算例验证了在线安全分析系统确实能够给电网运行提供安全校核及辅助决策，提升调控运行人员驾驭电网运行能力。

彭伟 于洋 张炜 陈存林 王正风/国网安徽省电力公司调度控制中心



彭伟/工程师

0 引言

随着特高压电网的快速发展，安徽电网已建成以1 000 kV和500 kV网架为骨干、220 kV电网覆盖全省的省级电网，电网运行特性发生了重大变化，同时新能源送电容量的持续增长，其随机性特点影响日益显著，给电网潮流方式和安全稳定特性带来了较大影响，面对这些挑战，深入推进调控运行业务转型，构建以电网在线分析为核心的调控运行体系势在必行。

安徽电网在线安全分析系统^[1-3]自2012年上线运行以来，在线分析工作在功能建设、机制建设、实际应用和队伍建设等方面取得了长足进步。在线安全分析应用对调控运行人员掌握电网运行特性、准确定位运行风险以及有效处置电网故障等方面提供了全面的分析手段与坚实的技术支撑。

1 系统结构

在线安全分析系统综合利用稳态、动态数据，通过稳态、动态和暂态多角度在线安全分析评估，以及电网运行全过程的稳定裕度评估，实现大电网运行的全面安全预警和多维多层协调的主动安全防御。系统主要包括数据整合、在线安全稳定分析、稳定裕度评估和运行控制辅助决策四个功能模块。安徽在线安全分析系统功能模块结构^[4]以及数据逻辑关系如图1所示。

关键词/Keywords

在线安全分析 ·
实时分析 ·
研究分析 ·
趋势分析 ·

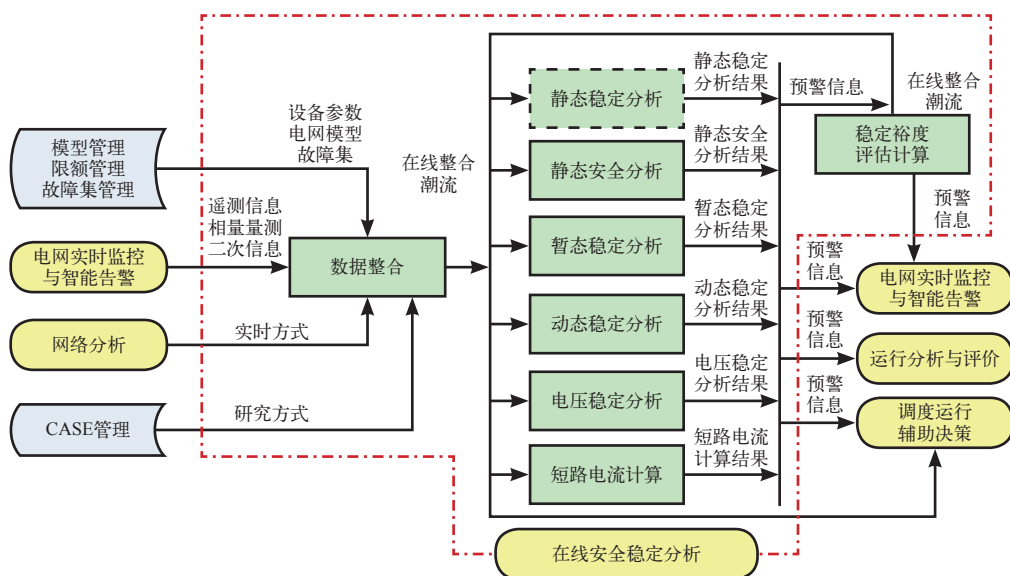


图1 安徽在线安全分析系统结构

2 系统功能

2.1 实时分析

在线实时分析基于电网实时运行数据，每15 min定期自动完成对当前方式的安全扫描，对实时电网运行方式进行安全稳定分析（静态安全分析、暂态稳定分析、小干扰稳定分析、短路电流分析和静态电压稳定分析）、稳定裕度评估和运行控制辅助决策计算，向调控运行人员提供当前运行方式下的电网预防控制措施方案，给出稳定极限和调度策略，实现电网安全稳定性的可视化监视和在线辅助决策，确保电网安全稳定运行。

实时分析是对电网当前实时运行方式的安全扫描，是在线安全分析系统应用的核心和基础，为调控运行人员了解和掌握电网安全稳定特性提供了方便、有效的工具。在线安全稳定分析功能通过实时评估当前工况和预想故障下电网的各类安全性，及时发现电网中存在的问题及隐患，为电网调控运行人员准确判断问题及其严重程度提供依据，有助于提升电网的安全稳定水平。稳定裕度评估功能实时计算断面极限，有助于调控运行人员了解断面裕度，合理利用断面的输电能力。运行控制辅助决策功能针对电网中存在的各类安全稳定问题和隐患，提供综合解决各类问题和隐患的决策建议，协助调控运行人员采取措施解决各类安全稳定问题。

2.2 研究分析

在线安全分析研究分析功能是基于在线实时或历史数据的离线分析，在实时数据或保存的历史断面数据的基础上，选择调控运行人员关心的断面数据，灵活设置所需的计算内容（如静态、暂态评估等）和所要考察的预想故障，通过对电网运行方式的调整，形成待研究的电网运行方式，从静态、暂态和动态等多维度离线分析和推演待研究电网运行方式的安全稳定状况，寻找可能存在的安全稳定问题及其成因，并研究其解决方法，达到优化电网运行，提升电网安全、稳定和经济性的目的。

研究分析功能用于开展电网预想方式分析，主要应用于以下四个方面：临时方式校核、重大方式变更校核、电网事故分析和故障预案编制等。

1) 临时方式校核。针对电网出现的临时方式，研究态模块可通过获取当前电网数据，并在此基础上进行运行方式调整，针对调整后的电网进行静态安全分析、暂态稳定分析、小干扰稳定分析、短路电流分析、电压稳定分析和稳定裕度评估六大类稳定计算，研究系统存在的风险点，并给出相应的辅助决策。

2) 重大方式变更校核。在电网重大倒闸操作、发受电计划大幅度调整、跨区和跨省断面停役操作前，利用研究态模块进行计算，分析重大方式变更后电网的安全稳定状况，计算结果可用于与操作后的实际情况进行比对。

3) 电网事故分析。对于主网线路跳闸、主变压器跳闸等事故进行电网事故后分析，通过选取事故发生前历史断面数据，设置真实故障保护动作逻辑，对故障过程进行反演，计算内容包括潮流比对、暂态稳定分析等，并将仿真曲线与PMU曲线进行对比，通过实际电网扰动校核电网模型合理性和参数正确性，分析电网故障形态及故障后电网运行风险等。

4) 故障预案编制。针对电网多重检修、重大故障及重大节日期间等特殊方式，基于在线数据，针对性开展预想故障分析，包括静态、暂态和动态安全稳定分析等，并针对不安全的情况研究对应的辅助决策措施，辅助故障预案编制。

2.3 趋势分析

电网运行状态趋势分析^[6-7]技术基于电网当前运行方式、在线安全稳定分析结论、超短期负荷预测、检修计划、短期交易计划和实时发电计划等数据，形成电网未来一段时间内的预估潮流，在此基础上，依据评价电网运行趋势的特征指标，对电网在未来一段时间内的安全性变化趋势快速评估。

趋势分析的主要功能包括未来态潮流分析、安全稳定趋势评估等。未来态潮流分析是根据电

网当前运行方式、计划数据和预测数据,遵循电力系统实际运行的规律进行潮流自动调整,预估形成电网未来运行状态的潮流数据。安全稳定趋势评估是基于未来态电网潮流断面,进行静态安全分析、暂态稳定分析、短路电流分析、电压稳定分析、小干扰稳定分析和稳定裕度评估,在此基础上结合当前运行潮流和安全稳定分析结论进行趋势量化评估,将系统当前状态评估结果和未来多个时段系统评估结果展示给调控运行人员,辅助其快速从众多单个时间断面的分析结果中判断出系统的安全隐患以及该隐患在后续多个时段的演变情况。

3 应用及算例

3.1 实时分析算例

某日安徽电网在线安全分析系统提示220 kV游汉2816、游汉2817线路N-1越限,在线静态安全分析结果如表1所示。

表1 在线静态安全分析结果

切除元件	越限元件	故障后值/kA	限值/kA	越限百分比(%)
游汉2816线路	游汉2817线路	0.623	0.6	103.83
游汉2817线路	游汉2816线路	0.622	0.6	103.67

经查看,游汉2816、2817线路实时潮流分别为175.25 MW和176.78 MW,潮流较重。若此时游汉双线中任一回路跳闸,另一回路将过载。在线分析辅助决策如表2所示,预测辅助决策调整后分析结果如表3所示。

表2 游汉双线线路N-1辅助决策

投运机组名称	调整量/MW	调整后功率/MW
华六厂4#机组	-120.6	429.4

表3 游汉双回路N-1辅助决策调整后结果

交流线名称	调整前越限百分比(%)	调整后越限百分比(%)
游汉2817线路	103.83	92.97
游汉2816线路	103.67	92.19

游汉双线潮流较重的主要原因是华六厂4#机组出力较大,因此辅助决策中减少华六厂4#机组出力可有效降低游汉双线潮流,解决游汉双线N-1过载问题。

参考表2在线辅助决策,结合电网运行实际,对华六厂4#机组出力进行调整,下一断面时刻在线静态安全分析结果中已无游汉双线N-1越限信息,在线辅助决策预测结果与实际调整后结果基本一致。

3.2 研究分析算例

(1) 重大方式变更校核

某日安徽滁州地区清流变电站500 kV 2#主变压器计划检修,在清流变电站500 kV 2#主变压器停役前,利用研究分析功能选取断面进行预想方式分析,模拟拉停清流变电站500 kV 2#主变压器后,静态安全分析存在越限或重载的校核结果如表4所示。

表4 清流变电站500 kV 2#主变压器预想停役后校核结果

故障元件	越限/重载元件	负载率(%)	越限/重载原因
清流变电站500 kV 1#主变压器	220 kV香黄2C65线	115	载流量受限
清流变电站500 kV 1#主变压器	220 kV禹凤4726线	98	接近长期载流量
清流变电站500 kV 1#主变压器	220 kV禹凤4724线	97	接近长期载流量

表4结果显示,清流变电站500 kV 2#主变压器停役后,若清流变电站500 kV 1#主变压器跳闸,滁州地区电网受电断面将重载甚至过载,主要原因为:滁州地区电网为典型电磁环网,清流变电站500 kV 2#主变压器停役后,滁州电网受电能力减弱,且地区电网仅有几台小容量风电场和一个抽水蓄能电站,无充足、可靠电源支撑,若清流变电站500 kV 1#主变压器再跳闸,受电压力将转移至地区间220 kV联络线,导致香黄2C65线路严重过载,禹凤4724、4726双线重载。

表5为辅助决策显示,通过增加田家庵厂机组出力,限制滁州地区若干变电站(黄栗树变电站、滁县变电站)负荷,可有效消除香黄2C65线路越限问题,并且不引起新的设备N-1过载。

表5 清流变电站500 kV 2#主变压器预想停役辅助决策

机组或负荷节点名称	调整量/MW	调整后功率/MW
黄栗树变电站 1#主变压器	-17.7	43.3
滁县变电站 1#主变压器	-10.7	60.5
田家庵厂6#机组	28.4	283.5

根据辅助决策结果，增加田家庵厂6[#]机组出力，将滁州地区内部分负荷转移至区外供电（约40 MW）。采取上述控制措施后，正常停运清流变电站500 kV 2[#]主变压器，停运后实时态分析结果如表6所示。通过上述措施有效地消除了香黄2C65线路静态 $N-1$ 过载问题。

表6 清流变电站500 kV 2[#]主变压器操作后实时态分析结果

故障元件	越限元件	负载率(%)
清流变电站500 kV 1 [#] 主变压器	220 kV香黄2C65线	92
清流变电站500 kV 1 [#] 主变压器	220 kV禹凤4726线	88
清流变电站500 kV 1 [#] 主变压器	220 kV禹凤4724线	87

(2) 重大方式变更校核电网事故后分析

某日，500 kV官山变电站都山线/永山线5032开关电流互感器B相故障，500 kV永山5338线路、都山5392线路和文都变电站500 kV 1[#]主变压器相继保护动作跳闸。针对上述故障，在获取保护动作信息后，利用研究分析功能选取故障前在线数据断面，模拟500 kV永山5338、都山5392线路和文都1[#]主变压器 $N-3$ 复合故障，进行事故分析。

1) 稳定分析计算。总体上，500 kV都山5392、永山5338线路和文都1[#]主变压器 $N-3$ 故障后近区电网断面潮流均大幅波动后趋于平稳，系统运行稳定，无设备潮流电压越限，未出现暂态稳定、小干扰稳定和电压问题。

2) 仿真曲线与PMU曲线比对分析。

以故障冲击最大的500 kV文官5391线路潮流以及官山500 kV I 母线电压为对象进行比对分析，如图2、图3所示。

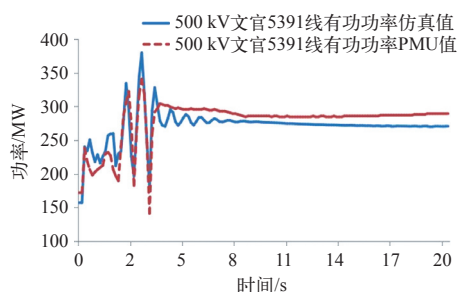


图2 500 kV文官5391线路在线有功功率仿真曲线与PMU实测曲线对比

对500 kV文官5391线路曲线进行Prony分析，结果如表7所示，分析发现仿真曲线与PMU曲线振

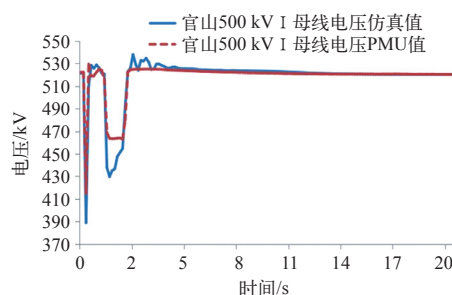


图3 500 kV官山 I 母线电压仿真曲线与PMU实测曲线对比

荡频率接近。

表7 500 kV文官5391线路有功功率仿真曲线与PMU曲线PRONY分析对比

文官5391线有功功率Prony分析	振幅/MW	频率/Hz	阻尼(%)
在线数据	191.25	1.23	20.15
PMU实测	175.46	1.14	18.76

对于本次故障，在线仿真曲线和实测PMU曲线的结果略有差异，功率差异量主要在故障时刻，差异在40 MW内，起始和结束时刻功率差异较小，两者曲线基本一致，进一步验证了在线计算结果的准确性。

4 结束语

在线分析作为电网实时调控运行中的核心环节，目前已较好地融入到调控运行业务中来，为电网事前风险预警、实时运行控制和故障紧急处置提供了安全校核及辅助决策支撑，但从实际电网运行需求出发，仍需进一步完善模块功能，提升实用化水平，要开展以下工作。

1) 极端外部环境下的在线安全稳定评估^[8]。对现有仅基于电网本身信息的在线安全分析功能进行提升和扩展，在融合电网自身信息和外部环境信息的基础上，通过在线安全分析技术，在线评估极端外部环境对电网设备以及电网安全稳定性的影响，有效提升电网应对极端外部灾害的能力。

2) 在线机电—电磁暂态混合仿真。目前电网在线安全系统只能进行机电暂态仿真，尚不具备高压直流输电与柔性交直流系统设备内部故障、HVDC与FACTS控制系统对主设备特性影响的功能，因此有必要考虑在现有的在线分析系统中引入机电—电磁暂态混合仿真功能。

3) 稳控策略在线优化。基于当前电网运行工况, 针对稳控系统覆盖的预想故障, 考虑稳定控制措施的约束条件, 基于控制代价最小原则, 采用安全稳定量化分析技术, 首先校核稳控策略下系统的安全稳定性, 若系统存在安全稳定问题, 则在稳控系统离线策略候选控制空间中进一步追加控制措施, 直到系统临界安全稳定; 若系统安全稳定, 则试探减少控制措施, 直到系统临界安全稳定, 得到与当前工况相匹配的临界策略, 达到稳控策略在线优化目的。

4) 大数据挖掘。基于大数据技术, 利用在线分析的历史计算数据和结论, 开展静态安全变化趋势分析、稳控策略适应性评价及断面稳定极限规律研究等, 总结电网运行经验, 建立周期性的电网安全后评估机制。

参考文献

- [1] 严剑峰, 于之虹, 田芳, 等. 电力系统在线动态安全评估和预警系统 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (34): 87-91.
- [2] 蔡斌, 吴素农, 王诗明, 等. 电网在线安全稳定分析和预警系统 [J]. 电网技术, 2007, 31 (2): 36-41.
- [3] 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.
- [4] 国家电力调度控制中心. 大电网在线分析理论及应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [5] 孙树明, 谢昶, 吕颖, 等. 电力系统在线安全稳定分析应用模式 [J]. 电网技术, 2015, 39 (10): 2875-2881.
- [6] 严剑峰, 冯长有, 鲁广明, 等. 考虑运行方式安排的大电网在线趋势分析技术 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (1): 111-116.
- [7] 谢昶, 刘文颖, 文晶, 等. 基于多数据源的日前预报潮流自动生成方法 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (21): 87-92.
- [8] 薛禹胜, 费圣英, 卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思: (一) 挑战与反思 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (9): 1-6.
- (收稿日期: 2017-06-20) **EA**
- [9] 丁明, 肖遥, 张晶晶, 等. 基于事故链及动态故障树的电网连锁故障风险评估模型 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (4): 821-829.
- [10] 谢月. 网页排序中算法和算法的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [11] 程林, 刘满君, 何剑, 等. 基于马尔可夫过程的电力系统连锁故障解析模型及概率计算方法 [J]. 电网技术, 2016; 40 (1): 1-6.
- [12] 丁明, 朱自强, 张晶晶, 等. 保护隐性故障及其对电力系统连锁故障发展影响 [J]. 高电压技术, 2016, 42 (1): 256-265.
- [13] Si Dajun, Sun Qiming, Shi Libao, et al. Analysis of cascading failure considering load-shedding strategy and failure correlation [C]. 2016 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2016: 1-6.
- [14] 崔晓丹, 方勇杰, 周霞, 等. 基于风险的输电断面经济输电功率计算 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (8): 30-34.
- (收稿日期: 2017-06-06) **EA**

(上接第58页)