

基于DSA/PMU的多重复合故障仿真分析

随着我国大电网互联的快速发展,特高压电网建设的稳步推进,电网的技术水平和复杂程度越来越高,电网运行的难度也越来越大,传统离线分析难以暴露出电网所有的薄弱环节。阐述了电力系统在线动态安全分析对电网安全稳定运行的重要作用,介绍了在线暂态稳定计算的基本原理,利用在线系统研究态进行事故实例仿真,并将结果与相量测量单元(PMU)实测曲线进行对比,进一步验证了在线计算的准确性与可靠性,表明在线安全稳定分析应用能为电网调控人员提供有益的指导,具有较高的实用价值。

郭力 谢毓广 郑国强 计长安 洪伟/国网安徽省电力公司电力科学研究院

0 引言

目前,我国电网主要通过由“三道防线”构成的稳定控制系统来预防大停电的发生。现有的第二道和第三道防线采用的是“离线计算、在线匹配”的预案式控制模式。然而,随着跨区域互联电网的形成、大规模风电的接入,电网的运行方式变得更加复杂多变且不可预测。由于系统不可预测的变化因素太多,实际运行工况往往无法与离线计算所设定的预想工况相匹配。所以,基于典型运行方式和简单故障的离线分析难以暴露出电网所有的薄弱环节。在某些特殊运行方式下可能存在严重的安全隐患,基于离线分析制定的决策在应用时可能出现失配,从而使紧急控制失效,进而导致大面积停电事故。离线安全分析已经不能满足新环境下电网安全稳定运行的要求,开展在线安全评估的研究势在必行。文献[1-2]介绍了国内外大停电事件案例,分析了在线安全稳定分析的必要性,文献[3-8]介绍了我国在线安

全稳定分析研究现状与应用实现。

针对安徽省在线动态安全评估(Dynamic Security Assessment, DSA)系统应用情况,详细分析了在线暂态稳定分析机理,利用安徽省在线安全分析系统研究态模块仿真了2015年8月安徽省500 kV官山变电站5032开关电流互感器爆炸引起的多重复合故障,通过仿真结果与相量测量单元(Phasor Measurement Unit, PMU)实测数据对比,验证了安徽省在线计算的准确性与可靠性。表明安徽省在线安全分析系统具有较高的实用价值,能够为调控人员提供有益的指导。

1 DSA应用简介

安徽省智能电网调度技术支持系统DSA应用可在线跟踪安徽省电网的实际工况,对电网当前的静态、暂态和动态安全稳定及短路电流、断面极限、小扰动和孤网安全等进行在线计算分析和控制决策支持,实现安徽省电网安全稳定的可视化监视和在线辅助决策,通过友好的人机界面向调度运行人员提供当前运行方式下的电网预防控制措施方案。通过策略校核系统实现安控装置策略优化决策支持。其主要包括数据整合、静态稳定分析、暂态稳定分析、动态稳定分析(小干扰稳定分析)、电压稳定分析和稳定裕度评估计算六个功能模块。

2 在线暂态稳定机理分析

暂态稳定是指电力系统受到大扰动后,各同步电动机保持同步运行并过渡



郭力/工程师

关键词/Keywords

动态安全分析·
暂态稳定·
事故仿真·
相量测量单元·

到新的或恢复到原来稳态运行方式的能力。

在线暂态稳定分析是根据暂态稳定预想故障集,计算电力系统受到大干扰后各同步发电机保持同步运行及过渡到稳态运行方式的能力,并给出安全分析结果,其包括暂态功角裕度分析、暂态电压裕度分析和暂态频率裕度分析,其目的是在规定运行方式和故障形态下,对系统稳定性进行校验,并对继电保护和自动装置以及各种措施提出相应的要求。图1为在线暂态安全评估功能导图。

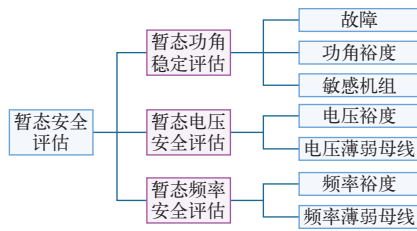


图1 在线暂态安全评估功能图

2.1 暂态功角裕度

暂态功角稳定裕度和模式分析采用EEAC(扩展等面积准则)方法,能够直观给出系统故障后的加速机群和减速机群。EEAC根据全网在故障下的发电机摇摆曲线,划分互补群^[9]。针对系统互补群的划分,通过互补群惯量加权平均角度相对值变换(CCCOI-RM),将 n 机系统观察空间映射到相应的单机空间,等效的单机无穷大(OMIB)系统的稳定性可以在 $P-\delta$ 平面上用动能增加面积 A_{inc} 和动能减少面积 A_{dec} 构成的暂态功角稳定裕度 η_δ 来描述,即

$$\eta_\delta = \begin{cases} \frac{A_{dec} - A_{inc}}{A_{dec}} \times 100\% & \text{if } A_{dec} > A_{inc} \\ \frac{A_{dec} - A_{inc}}{A_{dec}} \times 100\% & \text{if } A_{dec} \leq A_{inc} \end{cases} \quad (1)$$

如果 $A_{dec} > A_{inc}$,裕度 $\eta_\delta > 0$,则系统功角稳定;如果 $A_{dec} < A_{inc}$,裕度 $\eta_\delta < 0$,则系统失去功角稳定;如果 $A_{dec} = A_{inc}$,裕度 $\eta_\delta = 0$,则系统功角临界稳定。

2.2 暂态电压裕度

在暂态仿真过程中,分别考核系统中每条母

线的暂态电压跌落可接受性(TVDA),用一组二元表 $[(V_{cr,1}, T_{cr,1}), \dots, (V_{cr,i}, T_{cr,i})]$ 来描述一条母线的暂态电压跌落可接受性问题,如果对于所有的二元表,该母线电压低于电压门槛值的持续时间都小于对应最大允许持续时间,则认为该母线的电压跌落是可接受的^[10]。

暂态电压偏移可接受性裕度 η_{vd} 定义为

$$\eta_{vd} = [V_{ext} - (V_{cr} - kT_{cr})] \times 100\% \quad (2)$$

式中, V_{cr} 、 T_{cr} 分别为母线的电压偏移门槛值和允许的持续时间,通常分别取为0.75 pu、1 s; V_{ext} 、 k 为经EEAC方法计算出的暂态过程中母线电压的极值和把临界电压偏移持续时间换算成电压的折算因子; η_{vd} 为正(或负)值表示电压偏移可以接受(或不能接受)。

暂态电压稳定裕度 η_{vs} 定义为

$$\eta_{vs} = H \frac{-dS/dt}{M_m} \times 100\% \quad (3)$$

式中, H 、 S 和 M_m 分别为感应电动机的惯性时间常数、转差和机械功率; η_{vs} 为正(或负)值表示感应电动机稳定(或失去稳定)。

暂态电压安全裕度 η_v 为 η_{vd} 和 η_{vs} 之间的小者,即

$$\eta_v = \min(\eta_{vs}, \eta_{vd}) \quad (4)$$

2.3 暂态频率裕度

同样在暂态仿真过程中,分别考核系统中每条母线的暂态频率偏移可接受性(TFDA),每条母线可能有多个二元表 $[(f_{cr,1}, T_{cr,1}), \dots, (f_{cr,i}, T_{cr,i})]$,可能同时包含反映频率过高的二元表和反映频率过低的二元表^[11-13]。

暂态频率偏移可接受性裕度 η_f 定义为

$$\eta_f = [f_{ext} - (f_{cr} - kT_{cr})] \times 100\% \quad (5)$$

式中, f_{cr} 、 T_{cr} 分别为母线的频率偏移门槛值和允许的持续时间; f_{ext} 为暂态过程中母线频率的极值; k 为把临界频率偏移持续时间换算成频率的折算因子; η_f 为正(或负)值表示频率偏移可以接受(或不能接受)。

最后,根据暂态功角裕度、暂态电压裕度以及暂态频率裕度量大小,暂态安全裕度 η 定义为

$$\eta = \min(\eta_\delta, \eta_v, \eta_f) \quad (6)$$

3 在线案例仿真

3.1 事故概况

2015年8月9日06点33分04秒,官山变电站5032开关B相电流互感器顶部爆炸着火。500 kV都山5392、永山5338线路保护均动作跳闸;文都变电站5012、5013开关均动作跳闸,5012开关失灵保护动作联跳1号主变压器各侧开关,造成安徽省500 kV主网N-3故障。图2为500 kV官山变电站近区电网接线图。

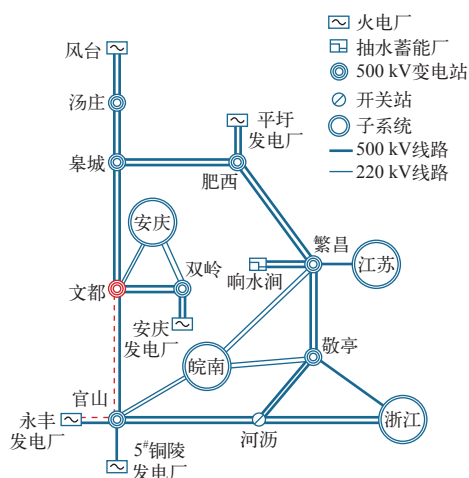


图2 500 kV官山变电站近区电网接线图

3.2 故障前方式安排

调取故障前 20150809_06:00:12 的在线安全分析应用历史数据。表 1 给出了故障前重要断面 / 机组 / 母线的 SCADA 值与在线值的对比结果。表 1 表明在线数据质量良好, 在电压、断面潮流方面, 在线数据与 SCADA 的偏差很小, 与电网实际运行方式十分接近。

表1 相关断面在线值与SCADA值对比表

(单位: MW/kV)			
交流线名	SCADA	在线	差值
皋文双线	78.23	76.94	1.29
官沥双线	713.69	709.28	4.41
官顺双线	134.35	130.55	3.8
永丰厂1#机组	331.10	329.46	1.64
永丰厂2#机组	326.22	325.37	0.85
安徽·文都/220 kV I A母线	230.08	229.47	0.61
安徽·官山/220 kV I A母线	228.9	229.22	-0.32

3.3 在线仿真分析

同样,取故障前 20150809_06:00:12 时刻的在线数据,模拟 500 kV 都山 5392,永山 5338 线路,文都^{1#}主变压器 $N-3$ 故障。故障设置如表 2 所示。

表2 在线仿真故障设置

故障类型	复合故障
故障元件	500 kV都山5392线路, 500 kV永山5338线路, 500 kV文都1 [#] 主变压器
故障设置	事件1: 500 kV都山5392线0 s故障, 0.061 s首末端同时跳闸, 0.89 s首末端同时重合, 1.18 s首末端同时再跳闸 事件2: 500 kV永山5338线1.2 s故障, 1.66 s首末端同时跳闸 事件3: 文都1 [#] 主变压器1.2 s故障, 1.66 s跳闸

通过仿真计算, 500 kV都山5392线、永山5338线、500 kV文都/1[#]主变压器N-3故障后, 永丰厂2[#]机组加速较大; 董店变电站/220 kV I 母线电压最为薄弱; 系统频率短暂波动后恢复正常。暂态安全裕度为42.51%, 主要受限于电压, 薄弱母线为董店变电站220 kV I 母线。

同时500 kV文官断面、官沥断面及220 kV官顺断面潮流均大幅波动后趋于平稳,无设备潮流、电压越限情况发生,未出现暂态/动态稳定失稳情况,系统运行稳定。图3为500 kV文官5391线路在线仿真曲线与PMU实测曲线对比图。图4为官山500 kV I 母线电压在线仿真曲线与PMU实测曲线对比图。

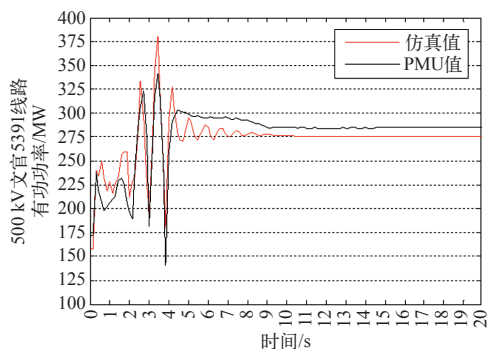


图3 在线仿真线路有功功率曲线与PMU实测曲线对比图

通过500 kV文官5391线路有功功率、官山500 kV I 母线电压幅值的仿真曲线与PMU曲线对比,仿

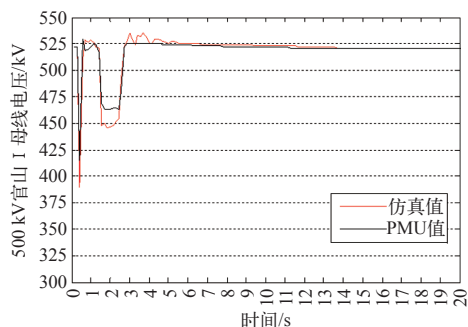


图4 在线仿真母线电压曲线与PMU实测曲线对比图

真曲线与PMU曲线走势基本一致，相似的波动幅度说明在线安全分析仿真模拟的有效性。

分析仿真曲线与PMU实测曲线仍存在一定的微小差异，主要是以下几点原因。

1) 因仿真曲线输出时间间隔与PMU曲线采样时间间隔不同，在数据处理过程中，对曲线产生一定影响。

2) 部分设备动态参数缺失、不准确（如负序、零序参数，机组PSS参数），系统在处理时产生误差。

3) 此次联锁故障保护动作过程十分复杂，在线仿真过程中作了适当的简化，也可能影响仿真曲线与实际曲线的一致性。

4 结束语

为了保证电力系统的安全运行，需要在线跟踪电网状态，随时掌握全网的稳定水平及安全裕度，以便及时发现运行风险及系统的薄弱环节，并采取有效的控制措施，因此，开展电网实时在线安全分析显得极其重要。本文分析了在线暂态裕度量化的计算机理，通过安徽省DSA应用研究态故障仿真分析，验证了：①安徽省在线基础数据质量良好，在电压、断面潮流方面，在线数据与SCADA的偏差很小，与电网实际运行方式十分接近；②在线仿真曲线与PMU曲线走势基本一致，相似的波动幅度说明在线安全分析仿真模拟的有效性。安徽省在线安全分析应用能够为调控人员提供科学的指导，具有较高的实用价值。

同时在仿真分析中也发现了一些不足之处：该系统设备模型只建模到220 kV主变压器高压

侧，对于110 kV网络及风电、小水电暂未考虑，有待在后期扩展设备建模范围，以便更好地模拟现实电网。

参考文献

- [1] 王敏. 大电网在线安全评估的理论与方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [2] 薛振宇. 电力系统在线动态安全分析系统的研究与应用 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [3] 杨以涵, 张东英. 大电网安全防御体系的基础研究 [J]. 电网技术, 2004, 28 (9): 23-27.
- [4] 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): 87-93.
- [5] 孙光辉, 毕兆东, 等. 电力系统在线安全稳定评估及决策技术的研究 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (17): 81-83.
- [6] 李建, 庞晓艳, 李雯, 等. 省级电网在线安全稳定预警及决策支持系统研究与应用 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (22): 97-101.
- [7] 郑超, 侯俊贤, 严剑峰, 等. 在线动态安全评估与预警系统的功能设计与实现 [J]. 电网技术, 2010, 34 (3): 55-60.
- [8] 石立宝, 周华锋, Peter T C Tam, 等. 电力系统实时动态安全评估及预警仿真系统的实现 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19 (23): 5401-5442.
- [9] 李光琦. 电力系统暂态分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [10] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论——非自治非线性多刚体系统的稳定性分析 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999.
- [11] 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.
- [12] 孙闻, 房大中, 薛振宇. 电力系统在线暂态稳定分析方法 [J]. 电网技术, 2009, 33 (14): 16-20.
- [13] 泰山, 薛峰, 许剑冰, 等. 基于EEAC的稳定性量化分析软件包 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (22): 55-58.

(收稿日期: 2015-11-12) EA