

暂态稳定在线预警故障集的自适应筛选

徐泰山, 薛禹胜, 李碧君, 鲍颜红, 杨卫东, 许剑冰, 崔晓丹

(国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003)

摘要: 大电网暂态安全稳定在线预警的故障数目大、计算负担重,为减少每轮在线预警中需要进行时域仿真计算的故障集数目,并且不遗漏暂态安全稳定的关键故障,提出了暂态安全稳定在线预警预想故障集的一种自适应筛选方法。首先依据上一时间断面上各预想故障的稳定裕度和稳定模式,识别那些影响系统稳定性的关键电网元件;再根据当前这些元件运行状态的变化,确定筛选预想故障的新门槛值;最后将本轮预想故障的预估裕度与该门槛值比较,筛选出那些需要重新计算稳定裕度的故障。通过电网在线预警系统的实际工程运行,验证了该方法的有效性和工程实用性。

关键词: 故障筛选; 自适应; 在线评估; 暂态安全稳定; 量化分析

中图分类号: TM712

0 引言

随着电力系统规模的不断增大、电力市场运行机制的不断推进和可再生能源发电的逐步接入,在线评估电力系统的安全性已成为电力系统运行调度的迫切需求和发展方向^[1]。构建在线安全预警和协调防御系统已成为国内外电网运行单位、研究机构和专家学者的共识^[2]。但要实现电力系统安全稳定性的在线评估,计算周期一般要求不大于 10 min。而在 10 min 之内完成大电网的成千上万个预想故障的安全稳定评估,计算负担十分沉重。实际上,对所有故障进行详细分析既不现实也无必要^[3]。现有的解决方法是电网调度运行人员凭经验筛选出少量的预想故障进行在线安全稳定评估,而筛选掉的大量预想故障就不进行在线评估了,其可靠性与电网调度运行人员的经验紧密相关。因此,亟需提出电力系统在线安全稳定评估预想故障集自适应筛选方法,摆脱预想故障集的设置对电网调度运行人员经验的依赖。

目前用于动态安全分析(DSA)的预想故障筛选及排队算法主要是基于人工智能和暂态能量函数的方法。人工智能法容易产生误分类问题,从而造成对严重故障的漏选。文献[4]利用模糊子集理论及 Taylor 级数,通过设计一个反映系统稳定度的连续分布的稳定指标,并设计一个相对保守的门槛值来进行预想故障的筛选。文献[5]提出了人工神经网络(ANN)与短时仿真相结合的混合故障筛选方法,克服了单纯使用 ANN 方法不能产生连续分类指标,从而导致误分类的问题。文献[6]根据故障清除时刻转子角度和速度,计算出故障清除时刻与故障前发电机转子角度差值的绝对值之和、发电机转子角度差值的绝对值最大值等 6 个性能指标,将每个故障在不同性能指标下由小到大排序的序号相加,获得该故障在综合性能指标下的序号,并由小到大重新排序,然后根据系统规模的大小判定排在设定数目之前的故障为无害或不严重故障。文献[7]将时域仿真与直接法相结合,计算出各个预想故障的临界切除时间和稳定裕度,用于非严重故障筛选、严重故障筛选,以及潜在故障的甄别。

以上方法应用于在线系统,在力求保留严重故障详细仿真的前提下,可以从一定程度上降低评估计算的规模。但都没有充分利用在线运行历史信息以及当前运行方式相对于历史运行方式的变化信息,因此很难协调好筛选效率与筛选正确性的矛盾。文献[8]提出了将 DSA 系统不断运行过程中获得的结果信息不断反馈到预想故障筛选环节,以完善预想故障集生成,但没有指出如何利用 DSA 历史信息进行预想故障集自动生成。

本文提出了依据电网上一轮安全稳定在线评估给出的各个预想故障的安全稳定裕度和模式,来确定本轮安全稳定在线评估需要重新计算的故障集的方法。

1 预想故障集自适应筛选框架设计

1.1 安全预警预想故障集^[9]

预想故障集(contingency set, CS)依据电网结

收稿日期: 2009-05-18; 修回日期: 2009-07-10。

国家科技支撑计划资助项目(2008BAA13B05); 国家火炬计划产业化资助项目(2008GH040637); 已申请国家发明专利(申请号: 200810243660.7)。

构生成。在线预想故障集(online contingency set, OCS)对应于电网实际运行状态,是CS的子集,通常可以按照一定的规则生成,其故障数目对于在线评估而言也相当大。OCS筛选的目的是筛选出电网当前运行状态下真正严重的故障,以便进行详细的安全稳定分析。考虑到电网正常运行状态下,大部分在线预想故障是非严重故障,用于在线安全预警系统评估的故障集应该由严重故障组成,是OCS的子集,可称之为安全预警预想故障集(safe-evaluating contingency set, SECS)。SECS与电网运行状态和安全稳定特性密切相关。

1.2 自适应筛选过程

自适应筛选过程如图1所示。首先通过故障过滤模块按照一定的规则生成OCS,例如根据电网当前运行状态剔除掉与停运元件关联的故障集。

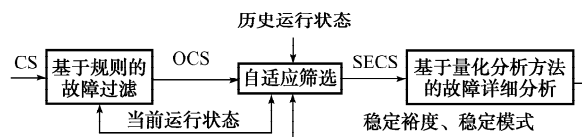


图1 SECS生成示意图

Fig.1 Schematic diagram of SECS generation

自适应筛选模块依据在线安全稳定预警系统历史运行过程中的电网运行状态及评估结果信息(包括各个预想故障下的稳定裕度和稳定模式),以及当前电网运行状态相对于电网历史运行状态的变化信息,确定本轮需要重新进行安全稳定计算的SECS。

2 自适应筛选方法

电网安全稳定裕度和安全稳定模式是电网安全稳定程度的量化指标,以安全稳定裕度为指标,结合安全稳定模式和电网运行状态的变化程度,实现本轮CS自适应筛选。具体方法如下。

2.1 稳定性量化分析

基于稳定性量化分析方法提供的各个预想故障下的安全稳定裕度和稳定模式信息,真正反映了不同的机组出力、不同母线负荷和电网结构的变化对安全稳定影响程度的差异,并能够界定电网安全稳定的薄弱环节。

基于时域仿真得到系统故障后的运行轨迹,采用安全稳定性的定量分析理论挖掘安全稳定裕度和安全稳定模式信息。基于扩展等面积准则(EAEC)理论,进行暂态功角稳定裕度计算和安全稳定模式分析;基于暂态电压跌落可接受性和电动机负荷的稳定性定量分析方法,进行暂态电压安全稳定性的定量分析和模式分析;基于暂态频率偏移可接受性

定量分析方法,进行暂态频率安全性的量化分析和模式分析^[10-11]。本文基于安全稳定性量化分析方法提供的稳定裕度和稳定模式,结合运行状态变化的大小实现CS自适应筛选。

2.2 关键元件的确定

采用安全稳定性量化分析算法,获得上一轮在线评估的各个故障下的安全稳定裕度、模式和输电断面极限功率,确定对安全稳定裕度影响比较大的元件,本文称之为关键元件。关键元件分为发电机、母线以及安全稳定输电断面。

对于发电机,利用下式计算其对电网安全稳定裕度的影响程度:

$$G_i = \sum_{j=1}^n k_{ij} (1 - \eta_j) \quad (1)$$

式中: η_j 为故障 j 发生后的功角稳定裕度; k_{ij} 为故障 j 的功角稳定模式中发电机 i 的参与因子。

对于母线,利用下式计算其对电网安全稳定裕度的影响程度:

$$B_i = \sum_{j=1}^n k_{ij} (1 - \eta_j) \quad (2)$$

式中: η_j 为故障 j 发生后母线 i 的暂态电压和/或频率安全稳定裕度; k_{ij} 为故障 j 的暂态电压和/或频率安全稳定模式中母线 i 的参与因子。

对于安全稳定输电断面,采用下式计算其潮流变化对电网安全稳定裕度的影响程度(影响程度大的那些元件即为关键元件):

$$L_i = \frac{P_i}{P_{i, \text{lim}}} \quad (3)$$

式中: P_i 为断面 i 的有功潮流; $P_{i, \text{lim}}$ 为断面 i 的有功潮流安全稳定极限值。

2.3 故障筛选的裕度门槛值计算

关键元件是基于对安全稳定的影响程度确定的,因此其运行状态变化必然影响预想故障下安全稳定裕度和模式,进而影响输电断面极限。本文依据当前电网运行状态相对于前一轮电网运行状态的关键元件运行状态的变化,如关键元件的投停、关键发电机出力变化量、关键母线电压变化和关键断面潮流变化量等,采用下式确定需要重新计算预想故障安全稳定裕度和模式的裕度门槛值:

$$\eta_{\text{cr}} = \eta_{\text{cr0}} + h \sum_i \left(g_i \frac{|x_{i,2} - x_{i,1}|}{x_{iB}} \right) \quad (4)$$

式中: $x_{i,1}$ 为对安全稳定裕度影响比较大的元件 i 的状态量上一轮在线评估中的值; $x_{i,2}$ 为相应的状态量在本轮在线评估中的值; x_{iB} 为相应状态量的基准值; g_i 为上述发电机、母线和输电断面潮流对电网

安全稳定裕度影响程度因子; h 为把电网安全稳定裕度影响程度换算成安全稳定裕度的换算因子; η_{cr0} 为裕度门槛的低限值(通常设为 0.2); η_{cr} 为故障筛选裕度门槛值。

2.4 安全稳定裕度预估

依据安全稳定裕度随时间增大其可信度下降的特性,采用安全稳定裕度随时间增大而减小的裕度-时间函数,在前一轮每个故障的安全稳定裕度的基础上,采用下式分别直接估算 CS 中每个故障的安全稳定裕度(其安全稳定模式保持不变):

$$\eta_{t_2} = \eta_{t_1} - k(t_2 - t_1) \quad (5)$$

式中: η_{t_1} 为上一轮在线计算出的安全稳定裕度; t_1 为相应的电网运行状态所对应的时刻; η_{t_2} 为本轮在线估算出的安全稳定裕度; t_2 为本轮所计算的电网运行状态所对应的时刻; k 为裕度随时间下降的斜率,具体数值需要依据电网安全稳定特性来确定,通常可设为每分钟裕度下降 1.2%。

2.5 SECS 确定

对于当前所有预想故障,本轮预估裕度小于裕度门槛值的则纳入 SECS,进行详细计算;对于当前状态下新增加的故障,直接纳入 SECS,进行详细计算。对于筛选掉的预想故障,其安全稳定裕度以式(5)估算出的裕度表示,其安全稳定模式保持不变;对于筛选出的预想故障,其安全稳定裕度和模式以重新详细计算出的裕度和模式表示。SECS 自适应筛选的计算流程如图 2 所示。

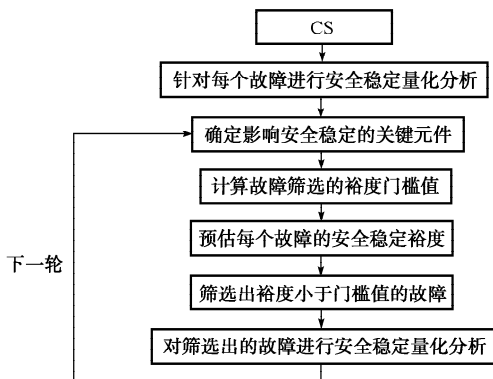


图 2 故障筛选流程

Fig. 2 Flow chart of contingency screening

3 试验验证

将上述方法应用到实际电网在线预警系统,并进行了筛选效果的测试。统计约 1 h 内 2 个实际电网预想故障在线筛选情况,记录了各个轮次的保留故障数,详细的筛选结果见表 1。电网 1 的计算规模为 3 336 个计算节点,416 台发电机,电网 2 的计

算规模为 3 081 个计算节点,269 台发电机。预想故障为线路或变压器三相短路故障。在测试中,设备对电网安全稳定裕度影响程度因子 g_i 统一设为 1,把安全稳定裕度影响程度换算成安全稳定裕度的换算因子 h 设为 0.1,裕度门槛的低限值 η_{cr0} 设为 0.2,裕度随时间下降的斜率 k 设为每分钟裕度下降 1.2%,即大约 1 h,每个故障至少计算一次。在实际应用中,上述参数的设定值需要根据电网的实际来确定。电网 1 在线预想故障集的故障数为 280 个,经过筛选后,一轮的计算故障数为 8 个~51 个,平均约 19 个。电网 2 的 OCS 故障数为 94 个,经过筛选后,一轮的计算故障数约为 9 个~26 个,平均约 17 个。

表 1 电网 1 和 2 的各轮保留故障数
Table 1 Contingency number reserved for every cycle of power grid 1 and 2

轮次	保留故障数		轮次	保留故障数	
	电网 1	电网 2		电网 1	电网 2
1	10	21	11	27	19
2	14	21	12	9	9
3	18	11	13	9	11
4	10	16	14	31	13
5	47	23	15	10	13
6	14	19	16	23	14
7	51	22	17	9	15
8	12	24	18	8	17
9	21	26	19	8	
10	43	19	20	8	

通过对筛选掉的故障进行暂态安全稳定详细计算分析,经校核发现,被筛选掉的故障均为暂态安全稳定,并且其安全稳定裕度均较高。此外,保留的故障绝大多数是安全稳定裕度较低的严重故障。

4 结语

以电网安全稳定裕度为指标,结合安全稳定模式和电网运行状态的变化程度,从 CS 中筛选出需要重新计算的预想故障子集,作为满足工程实用要求的随电网运行状态变化的动态的 CS。通过在实际电网中的应用测试表明,该方法较好地筛选掉 CS 中那些实际稳定裕度较高的故障,从而大大降低了当前时间断面下需要详细计算的 CS 的规模,提高了在线安全稳定评估的计算速度。

参考文献

[1] 徐泰山,许剑冰,鲍颜红,等. 互联网预防控制和紧急控制在线预决策系统. 电力系统自动化,2006,30(7):1-4,36.
XU Taishan, XU Jianbing, BAO Yanhong, et al. On-line pre-decision based preventive and emergency control system for

- interconnected power grids. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 1-4, 36.
- [2] 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. 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. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 25-30.
- [3] CHAN K W, ZHOU Q, CHUNG T S. Dynamic security contingency ranking and generation reallocation using time domain simulation based severity indices// Proceedings of International Conference on Power System Technology: Vol 3, December 4-7, 2000, Perth, Australia; 1275-1280.
- [4] 吕志来, 张保会, 哈恒旭. 模糊子集和 Taylor 级数相结合的快速事故筛选方法. 电力系统自动化, 2000, 24(22): 16-20.
LÜ Zhilai, ZHANG Baohui, HA Hengxu. Integration of fuzzy set theory and Taylor series expansions for contingency screening of transient stability assessment. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(22): 16-20.
- [5] 顾雪平, 曹绍杰, 张文勤. 人工神经网络和短时仿真结合的暂态安全评估事故筛选方法. 电力系统自动化, 1999, 23(8): 16-19.
GU Xueping, TSO S K, ZHANG Wenqin. Integration of ANN and short-duration numerical simulation for contingency screening of transient security assessment. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(8): 16-19.
- [6] 王守相, 张伯明, 郭琦. 在线动态安全评估中事故扫描的综合性指标法. 电网技术, 2005, 29(1): 60-63.
WANG Shouxiang, ZHANG Boming, GUO Qi. Integrated performance index method of contingency screening in online dynamic security assessment. Power System Technology, 2005, 29(1): 60-63.
- [7] MACHADO F C M, DIAS PINTO J A, MACIEL BARBOSA F P. On-line security of an electric power system using a transient stability contingency screening and ranking technique// Proceedings of IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, May 7-9, 2002, Cairo, Egypt; 331-335.
- [8] 郭琦, 张伯明, 王守相. 基于 EMS 的动态安全分析系统. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 57-62.
GUO Qi, ZHANG Boming, WANG Shouxiang. A dynamic security analyzing system based on EMS. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 57-62.
- [9] 邵振国, 林智敏, 林韩, 等. 在线安全预警中的预想事故生成. 电力系统自动化, 2008, 28(8): 15-18.
SHAO Zhengguo, LIN Zhimin, LIN Han, et al. Online determination of predictive contingency in security forwarding analysis. Automation of Electric Power Systems, 2008, 28(8): 15-18.
- [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. 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. 电力系统自动化, 2002, 26(19): 1-7.
XU Taishan, XUE Yusheng. Quantitative assessments of transient frequency deviation acceptability. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(19): 1-7.

徐泰山(1968—), 男, 通信作者, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向: 电力系统安全稳定分析与控制。
E-mail: xutaishan@sgepri.com

薛禹胜(1941—), 男, 中国工程院院士, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统自动化。

李碧君(1966—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向: 电力系统安全稳定分析与控制。

On-line Adaptive Contingency Screening for Early-warning of Transient Stability

XU Taishan, XUE Yusheng, LI Bijun, BAO Yanhong, YANG Weidong, XU Jianbing, CUI Xiaodan
(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: The total number of contingencies needed by early-warning of transient stability is huge. In order to reduce the computation burden in every analysis cycle, an adaptive contingency screening method, which is designed to filter out slight cases as much as possible and keep all the severe ones for further detailed assessment, is presented. Based on the stability margins and dynamics modes of contingencies resulting from the last assessment cycle, the critical cases to system stability are firstly identified by using quantitative analysis method. Secondly, based on the changes in power flow on the critical elements, stability margin thresholds for contingency screening are identified. Finally, those contingencies need further detailed analysis for new cycles can be determined by comparing the prediction value and the relevant thresholds. Real engineering applications in actual power grid have fully confirmed the validity and practicability of this method.

This work is supported by National Key Technology R&D Program (No. 2008BAA13B05) and Nation Torch Program (No. 2008GH040637).

Key words: contingency screening; adaptive decision; on-line assessment; transient security and stability; quantitative analysis