

在线预决策稳定控制系统在粤北电网的应用研究

王珂¹, 吴烈鑫¹, 李威², 方勇杰²

(1. 广东省电力调度中心, 广东 广州 510600; 2. 国电自动化研究院, 江苏 南京 210003)

摘要: 介绍了粤北电网在线预决策稳定控制系统的设计、运行原理及实施情况, 并提出新的设想。该系统采用动态开断潮流法进行静态安全分析, 采用匹配关键节点状态和网络拓扑结构的方法进行状态估计。通过实时数据仿真分析证明, 该系统在确保电网暂态稳定和静态安全满足要求的同时, 可实现追求最小综合控制代价的目标。该系统显著提高了粤北电网的送出能力, 且具备一定的适应电力市场环境的能力。

关键词: 在线预决策; 稳定控制; 静态安全; 电力市场环境

Research of online pre-decision stability control system for North Guangdong Grid

WANG Ke¹, WU Lie-xin¹, LI Wei², FANG Yong-jie²

(1. Guangdong Power Dispatching Center, Guangzhou 510600, China;

2. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: Design, operation principle and implementation of online pre-decision stability control system for North Guangdong Grid is introduced, and a new assume is put forward. Dynamic breaking power flow algorithm is used in analysis of static state security, matching method for key node state and network topology is adopted in state estimation. Through simulation of real-time data, it is proved that, considering the power system transient stability and static state security can meet a demand, this system can also take the total control cost as the objective function. This system can increase the transmission capability of North Guangdong obviously, can be used in electricity market environment.

Key words: online pre-decision; stability control; static state security; electricity market environment

中图分类号: TM712 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2008)12-0039-05

0 引言

近年来国内外电网频繁遭遇罕见运行方式, 且多次发生双回 500 kV 线路相继跳闸故障, 对系统安全稳定运行造成恶劣影响。北美“8.14”大停电由扰动到系统崩溃的每个演化阶段, 就是因为缺乏自适应的紧急控制技术, 才无法制止系统稳定性的进一步恶化。尤其在电力市场环境下, 由于发电竞价及输电转运业务的随机性, 机组出力及电网潮流分布亦随机变化, 电网运行控制的难度明显增加。

电网故障发生后根据短时段内实际受扰轨迹来预测未来轨迹、并进行紧急控制决策的“实时决策、实时控制”方案, 目前无论在理论上还是在实践上都无法取得突破。因此, 基于“在线预决策、实时匹配”思想的在线预决策稳定控制系统是目前现代大电网稳定问题的最佳解决方案^[1]。

粤北电网是广东电网的主要电力送出端, 与主

网联网薄弱。随着电网结构的变化、统调电源及地方电源的增加, 新的电网安全稳定问题不断涌现。原有稳定控制措施^[2]已不能适应电网安全稳定运行的要求, 需从控制功能、状态估计精度、控制策略、在线运行可靠性、计算速度、控制代价等多方面进行全新设计, 方能保障粤北电网安全。

本文对在线预决策稳定控制系统的设计、功能配置、运行原理、实际应用进行了描述, 并提出新的设想。

1 粤北电网运行现状

目前粤北电网南送通道由两个 500/220 kV 电磁环网构成。一旦 500 kV 曲江——北郊双回线路发生跳闸故障, 将导致粤北电网暂态稳定严重破坏及多条 220 kV 线路明显过载等突出问题, 电网运行形势极为严峻。粤北电网结构如图 1 所示。

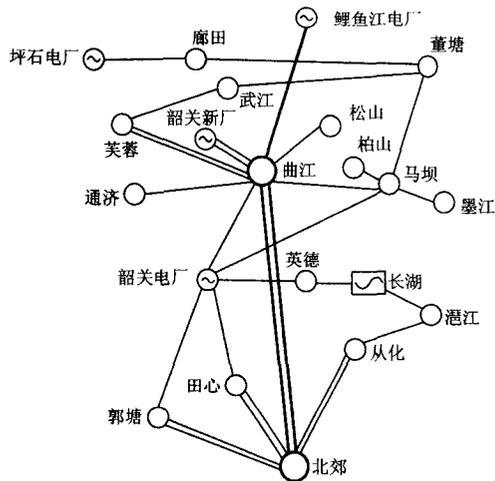


图1 粤北电网结构图

Fig.1 Configuration of North Guangdong Grid

2 系统设计

以保障粤北电网安全稳定运行、优化控制策略为目标,笔者从控制功能、状态估计功能、控制策略、运行可靠性等角度对粤北电网在线预决策稳定控制系统进行了详细的功能设计,同时综合考虑适应电力市场发展的要求。

2.1 控制功能

1) 暂态稳定控制策略搜索

暂态稳定控制策略自动寻优功能,采用 EEAC 稳定性定量分析方法^[3]。经全过程积分得到全过程的系统动态轨迹,继而抽取系统稳定性的定量信息得到稳定裕度,结合所采用切机措施的控制代价就可计算出其性能代价比,以确定最优搜索方向。搜索过程一直进行到系统的稳定裕度满足要求为止,所得到的控制措施即使系统暂态稳定的最优控制策略。其中功角稳定裕度描述如下:

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

A_{dec} 为动能减少面积, A_{inc} 为动能增加面积。

2) 静态安全控制策略搜索

通常的静态安全分析采用的是各种直流潮流校核算法,以往在线控制均采用在此基础上各种灵敏度分析方法。然而,研究发现,仅仅依赖于电力网络方程的线性化,而不考虑发电机、负荷等状态变量对电网扰动的准稳态的物理响应过程,虽在一般的静态电力网络分析中可行,但难以适应在线预决策的严格要求。为确保在线静态安全分析控制的

可靠性、准确性、快速性,以及对各种场景应具有很强的鲁棒性,粤北电网在线预决策稳定控制系统采用了动态开断潮流方法来解决该问题。

$$\eta = \frac{I_{over} - I_n}{I_n} \times 100\% \quad (2)$$

其中: I_{over} 为实际电流值, I_n 为额定载流量。

动态开断潮流方法模拟全网所有机组参与一次调频和二次调频运行,可解决电网严重故障下常规潮流计算不收敛的问题,同时保证足够的精度;克服了直流潮流算法及常规单平衡机补偿方法的不足,便于寻求解决静态安全问题的优化切机措施,保障系统暂态稳定和静态安全同时满足要求。

3) 综合控制

粤北电网在线预决策稳定控制系统,同时解决电网暂态稳定和静态安全问题,并在此基础上寻求优化控制策略。

应用安全稳定控制系统正确识别电网故障,并按照合理的预定控制策略表及时执行连锁切机措施,可有效降低互补机群之间的相对加速度,消除电网设备过载,实现同时解决电网稳定及安全问题的目标。安全稳定综合控制机理可描述如下:

$$\begin{cases} \eta_{sta}(N_1, N_2, \dots, N_n) > \varepsilon \\ \eta_{sec}(N_1, N_2, \dots, N_n) > \varepsilon \\ \text{s.t. } \min J = \sum_{i=1}^n C_i N_i \end{cases} \quad (3)$$

其中: η_{sta} 是暂态稳定裕度, η_{sec} 是静态安全裕度, N_i 是参与控制的各台机组, C_i 是每台机组的切机容量代价。

2.2 状态估计

状态估计的目的是利用量测量的冗余,估计出能表征系统运行状态的全部变量。如何根据有足够冗余度的本地信息和有限数量的远方量测推算全网运行状态,是在线状态估计的目标和难点^[4]。根据粤北电网的网络结构特点,只要保证计算数据的关键节点状态和网络拓扑结构与全网状态估计所获得的电网状态一致,则两者的稳定分析结果就基本相同,这为设计在线预决策计算数据源的获取技术提供了重要依据。

粤北电网在线预决策实测数据,除粤北地区各稳定控制装置安装厂站的状态信息外,还包括北郊通信站传送的重要设备信息。运行方式人员负责提供不同季节、不同负荷水平的广东全网典型方式数据。在线预决策系统根据电网典型运行方式和远方实测数据推算远方不可观区域中状态变量的伪量测

量。问题转换为以下非线性优化的求解:

$$\min [(\Delta P_1 / P_{1N})^2 + (\Delta P_2 / P_{2N})^2 + \dots + (\Delta P_n / P_{nN})^2] \quad (4)$$

$$\text{s.t. } \Delta P_1 G_{l-1} + \Delta P_2 G_{l-2} + \dots + \Delta P_n G_{l-n} = \Delta P_l \quad (5)$$

$(l=1, 2, \dots, m)$

$$\text{s.t. } U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中: $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n$ 为计入部分实测信息条件下, 不可观区域中各节点有功功率的变化量; $P_{1N}, P_{2N}, \dots, P_{nN}$ 为典型方式下的初始功率。

1) 第一类约束条件保证了估计计算结果满足实测线路有功潮流的要求; 式中 $G_{l-1}, G_{l-2}, \dots, G_{l-n}$ 为实测线路有功潮流对于节点有功注入功率的灵敏度系数; ΔP_l 为相对于对应方式的实测线路有功潮流变化量, m 是实测线路条数。

2) 第二类约束条件是关键节点电压的上下限约束。

求解上述二次规划问题, 可得各节点有功注入功率变化量 $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n$, 修正后作为伪量测量 (无功功率处理方法完全一致), 然后将这些伪量测量和就地的冗余实测量一起进行在线状态估计, 即可得到系统有功、无功等状态量。

2.3 控制策略设计

粤北电网在线预决策系统制定了以每台机组为切除对象的控制策略, 与以切机容量为对象的控制策略相比, 更能体现粤北地区不同机组对电网暂态稳定及静态安全影响的灵敏度, 且便于实现兼顾全局安全及电厂利益的切机原则。

2.4 系统运行可靠性设计

为提高系统在线运行的可靠性, 粤北电网在线预决策稳定控制系统可以在离线模式与在线模式之间自动切换: 在判定运行方式不一致、计算超时、无稳定控制措施、通信异常等异常现象时, 系统将自动切换至离线模式运行; 待正常后可自动恢复在线模式运行。

2.5 电力市场环境的适应性

1) 电力市场竞争机制的引入给电力系统运行增加了不可预测的因素, 对于经济性的追求将可能导致局部区域稳定性的下降, 系统安全稳定隐患随时可能凸现。运行人员必须具备对系统稳定性量化评估的能力, 而不能以模糊的安全与不安全、稳定与不稳定来评估。粤北电网在线预决策稳定控制系统可实时给出电力系统运行的稳定裕度量化指标, 自动识别潜在的安全稳定隐患, 及时提供有效的控制措施, 可适应机组出力多变、输电设备潮流多变的

电力市场环境。

2) 电力市场环境中, 所有发电厂都是独立核算且地位平等的经济主体, 其竞争力完全取决于该电厂的实时报价。粤北电网在线预决策稳定控制系统, 可将各电厂的实时报价定义为控制代价, 在每一次控制策略搜索过程中首先对实时报价进行排序, 并优先选择报价高的电厂机组作为切机控制对象。在保证系统稳定的基本前提下, 综合考虑切机控制代价, 充分体现了稳定性与经济性的统一。

3 系统的功能配置及运行原理

3.1 功能配置

粤北电网在线预决策稳定控制系统, 由在线预决策 OPS 子系统与区域稳定控制系统共同组成。区域稳定控制系统由曲江控制主站、北郊通信站, 以及韶关 A 厂等六个切机执行站稳定控制装置组成, 整套系统属双机单通道模式。

在线预决策 OPS 子系统的硬件体系结构采用计算机集群技术, 软件体系采用分布式并行计算平台结构。其中管理角色服务器集管理功能、状态估计功能、人机接口功能于一身, 其它计算角色服务器并行执行暂态稳定裕度、静态安全裕度、最优决策搜索等计算任务。OPS 子系统通过接口程序与曲江主站稳定控制装置相联, 实现数据通信功能。

3.2 运行原理

粤北电网在线预决策稳定控制系统存在两种执行模式, 即在线模式和离线模式, 两种模式之间可相互切换。

在线模式主要流程为: OPS 子系统实时接收在线实测数据; 在线状态估计; 计算任务拆分; 在线控制策略下发, 运行流程如图 2 所示。

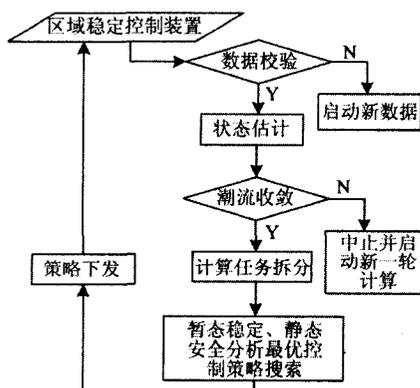


图 2 在线预决策稳定控制系统运行流程图

Fig.2 Flow chart of online pre-decision stability control system operation

4 实际应用

为验证在线预决策的正确性及有效性,试运行期间针对现场多个实测计算结果进行了大量仿真校验。预想故障类型考虑单相瞬时短路故障、单相永久短路故障、三相永久短路故障,控制对象是粤北地区可切机组,控制代价预先设定。某时刻在线预决策的计算结果见表 1。

表 1 在线预决策计算结果

Tab.1 Result of online pre-decision calculation

序	电网故障类型	暂态稳定控制方案	综合控制方案
1	韶田线单瞬故障	稳定	安全
2	韶郭线单永故障	稳定	安全
3	曲北甲乙线一回三相短路、双回同时跳闸	切除鲤鱼江厂#1、#2、韶关新厂#10、坪石厂#2、#3机	切除鲤鱼江厂#1、#2、韶关新厂#10、坪石厂#2、#3机
4	曲北甲乙线异名同相单永故障	切除鲤鱼江厂#1机	切除鲤鱼江厂#1、#2、韶关新厂#10、#11机
5	曲江主变一台三相故障、两台同时跳闸	稳定	切除韶关新厂#10、#11机

采用 BPA 程序进行离线仿真校验,结果表明,状态估计后功率相对偏差满足精度要求,暂态稳定及静态安全控制措施满足要求。此外,以故障 3 为例,其它所有控制方案的最小切机量为 1200 MW,而在线预决策控制方案的切机量仅为 1050 MW,综合控制代价最小。

针对故障 3 进行暂态稳定校验的功角输出曲线见图 3。

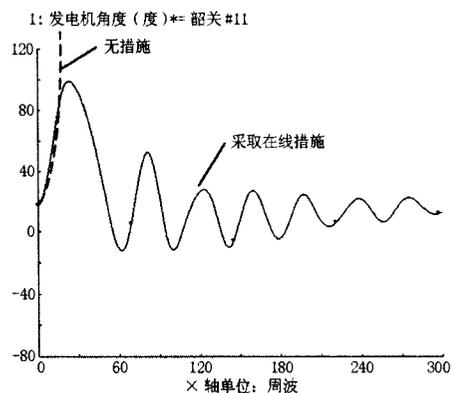


图 3 故障 3 功角输出曲线

Fig.3 Angle curve for fault 3

该在线预决策稳定控制系统投入运行后,正常

运行方式下粤北电网南送通道的稳定控制极限由 780 MW 提高至 1900 MW,显著提高了粤北电网的送出能力。

5 新的设想

1) 常规在线状态估计一般是将关键设备的有功、无功功率作为数据采集对象和最终匹配目标,但因现场二次设备无功采集精度偏低及电网无功分布复杂等原因,有可能造成某次状态估计后电网电压与实际偏差较大问题,从而可能造成某次状态估计及静态安全措施效果不理想。考虑到机组励磁系统调压的快速特性,建议在线状态估计考虑以关键设备的有功功率、关键点电压作为数据采集对象和最终匹配目标。

2) 如关键设备潮流发生突变,或电网运行方式发生突变情况,现有在线预决策系统无法提供严格匹配的在线策略,可以考虑增加在线预决策稳定控制系统的自学习功能^[5]或短期预测功能,以更好地解决控制措施对运行方式突变的适应性问题。

6 结论

应用于粤北电网的在线预决策稳定控制系统,摒弃了“离线预决策、实时匹配”的常规方法,试运行情况良好,较好地解决了粤北电网安全稳定问题。主要具备如下特点:

1) 将 EEAC 稳定性定量分析方法、静态安全分析方法、紧急控制快速决策搜索技术、区域稳定控制系统四者有机结合;

2) 采用动态开断潮流法进行静态安全分析,提高设备开断后潮流计算收敛性及计算精度;

3) 采用匹配关键节点状态和网络拓扑结构的方法进行状态估计,可快速有效地获取数据源;

4) 具备一定的适应电力市场环境的能力。

此外,本文就在线状态估计、运行方式突变适应性等方面提出了几点设想。

参考文献

- [1] 方勇杰,范文涛,陈永红,等. 在线预决策的暂态稳定控制系统[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (1): 8-11. FANG Yong-jie, FAN Wen-tao, CHEN Yong-hong, et al. An On-Line Transient Stability Control System of Large Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (1): 8-11.
- [2] 曾勇刚,秦华,方勇杰,等. 韶关电网在线预决策安全稳定控制系统的设计及实施[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (24): 45-47. ZENG Yong-gang, QIN Hua, FANG Yong-jie, et al.

- Design and Implementation of an On-Line Pre-Decision Based System Protection Scheme for the Shaoguan Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002,26 (24): 45-47.
- [3] 薛禹胜. EEAC 和 FASTEST[J]. 电力系统自动化, 1998. XUE Yu-sheng. EEAC and FASTEST[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998.
- [4] 鲍颜红, 方勇杰, 薛禹胜, 等. 在线预决策紧急控制系统中的若干问题[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (24): 1-2, 16. BAO Yan-hong, FANG Yong-jie, XUE Yu-sheng, et al. Practical Considerations on the On-Line Pre-Decision Emergency Control Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (24): 1-2, 16.
- [5] 周良松, 彭波, 等. 一个实用的电力系统分层决策稳定控制系统[J]. 继电器, 2000, 28. ZHOU Liang-song, PENG Bo, et al. Study on New Transient Stability Control Pattern with On-line Hierarchical Decision-making and Control[J]. Relay, 2000, 28.

收稿日期: 2007-10-15; 修回日期: 2008-01-09

作者简介:

王珂(1979-), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统运行分析、控制及策划等工作; E-mail: wangke777@126.com

吴烈鑫(1965-), 男, 副总工, 从事电力系统运行管理工作。

(上接第 34 页 continued from page 34)

- Alhabib BINKOU, YU Yi-xin, SUN Gang. Security Region Based Real and Reactive Power Optimization of Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (12): 1-10.
- [6] 胡伟, 卢强. 混成电力控制系统及其应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20 (2): 11-16. HU Wei, LU Qiang. Hybrid Power Control System and Its Application[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2005, 20 (2): 11-16.
- [7] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [8] 赵晋泉, 张伯明. 连续潮流及其在电力系统静态稳定分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (11): 91-97. ZHAO Jin-quan, ZHANG Bo-ming. Summarization of Continuation Power Flow and Its Applications in Static Stability Analysis of Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (11): 91-97.

收稿日期: 2007-10-31; 修回日期: 2007-12-18

作者简介:

王宽(1981-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: wangkuan81@163.com

郑勇(1973-), 男, 工程师, 主要从事电力系统继电保护、变电站综合自动化以及电气设备故障诊断等领域的研究和管理工作的;

陈佑健(1976-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统继电保护、变电站综合自动化以及电气设备诊断等领域的研究和维护工作。

(上接第 38 页 continued from page 38)

- [9] 马晋弢, Lai L L, 杨以涵. 遗传算法在电力系统无功优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(5): 347-353. MA Jin-tao, Lai L L, YANG Yi-han. Application of Genetic Algorithms in Reactive Power Optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(5): 347-353.
- [10] CUI Zhi-hua, ZENG Jian-chao, CAI Xing-juan. A New Stochastic Particle Swarm Optimizer[J]. Evolutionary Computation, 2004, (1): 316-319.
- [11] 丁玉凤, 文劲宇. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化研究[J]. 继电器, 2005, 33(6): 22. DING Yu-feng, WEN Jin-yu. Advanced PSO Algorithm of Reactive Power Optimization in Power System[J]. Relay, 2005, 33(6): 22.
- [12] 方鸽飞, 王惠祥, 黄晓烁. 改进遗传算法在无功优化中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(4): 17-20. FANG Ge-fei, WANG Hui-xiang, HUANG Xiao-shuo. Application of Improved Genetic Algorithm in Reactive Power Optimization[J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(4): 17-20.

收稿日期: 2007-10-17; 修回日期: 2007-12-09

作者简介:

张登科(1979-), 男, 硕士, 从事电气试验技术的应用研究, 群体智能在电力系统中的应用研究工作; E-mail: zhangdenko@tom.com

黄肇雄(1960-), 男, 博士, 教授, 研究领域为非线性系统建模与控制, 智能和优化控制理论及应用, 电力系统控制理论及应用等。