

互联电网预防控制和紧急控制在线预决策系统

徐泰山¹, 许剑冰¹, 鲍颜红¹, 方勇杰¹, 李碧君¹, 薛禹胜¹, 鄢安河², 孙含笑²

(1. 国电自动化研究院, 江苏省南京市 210003; 2. 河南电力调度通信中心, 河南省郑州市 450052)

摘要: 针对电网互联和电力市场化给电网安全稳定经济运行带来的挑战, 阐述了互联电网在线暂态安全分析与控制的重要性, 强调其在线预决策系统(OPS)不仅要考虑功角稳定性, 而且要计及电压和频率的安全性, 而预防控制和紧急控制也应该在协调的框架下研究。探讨了一体化 OPS 与调度中心其他系统的联系, 以及多个能量管理系统(EMS)和多个安全稳定控制系统的共享; 提出了相应的框架, 并采用分布式并行计算技术来提高该系统的快速性和可靠性。最后介绍了一个应用实例及其实施中的关键问题。

关键词: 预防控制; 紧急控制; 在线预决策; 互联电网; 暂态安全

中图分类号: TM712

0 引言

电网互联和电力市场化是现代电力系统的发展方向。电网互联实现了更大范围内的资源优化, 进一步促进了电力市场化。但是, 互联电网的稳定问题并不是子系统稳定问题的简单叠加, 失稳造成的损失和影响也更大。市场环境要求电网运行部门能够跟踪竞争的结果, 按照在线工况来动态修正运行极限值和控制策略, 挖掘电网的输电潜力。因此, 稳定性的在线定量评估和优化控制成为互联电网安全稳定经济运行和电力市场化运作的重要技术基础。

文献[1]综述了当前动态安全分析采用的主要方法。文献[2]介绍了基于扩展等面积准则(EEAC)的东北电网在线暂态功角稳定定量评估和极限功率计算系统, 该系统被国际大电网组织确认为国际上的首次工业应用^[3]。文献[4]提出“在线预决策, 实时匹配”的紧急控制框架, 该框架已经成为安全稳定控制的发展方向。文献[5]介绍了该类框架在实际电力系统上的首次应用, 但由于缺乏严格的稳定性定量分析方法, 其搜索策略基于稳定性的定性评估, 仅能处理首摆稳定问题, 也只能针对切机这一种控制措施。文献[6]介绍了集 EEAC、分布式并行处理平台和区域稳定控制装置于一体的紧急控制在线预决策系统(OPS), 该系统在线跟踪电网运行工况, 用 EEAC 提供的受控电力系统的稳定裕度指标, 针对给定故障集, 快速搜索满足一定稳定裕度、控制代价最小的控制策略, 刷新控制装置中的在

线策略表。文献[7]探讨了紧急控制 OPS 处理伪量测量的问题, 提出以安全稳定控制装置实测的线路有功为准, 采用二次规划法解决安全稳定控制装置的量测量与能量管理系统(EMS)数据或离线典型方式数据之间的不匹配。文献[8, 9]分别介绍了四川二滩和广东韶关紧急控制 OPS 的设计和应用。文献[10]探讨了外部系统在线信息量不足和利用工作站机群提高 OPS 计算速度的方法, 并介绍了在广西电网暂态功角稳定定量评估系统中的具体应用。

上述 OPS 要么仅仅针对定量评估及预防控制, 要么专门针对紧急控制。文献[11]指出预防控制与紧急控制有很强的互补性, 预防控制通过调整运行方式, 减少输送功率来提高系统的安全稳定性, 而紧急控制则通过故障后采取的措施, 在确保系统的安全稳定性下提高输送功率。二者之间存在着决策的优化问题, 需要从全局考虑解决系统稳定控制问题的最优方案。已有的 OPS 只针对暂态功角的稳定问题, 但由于互联电网中的电压和频率安全风险越来越大, 有必要扩展到暂态电压安全和暂态频率安全的在线定量评估和优化。

除了综合功角、电压和频率安全稳定一体化的定量分析技术和控制策略优化计算技术之外, 互联电网实际运行状态、预想故障集和可选控制措施及其代价的在线确定以及如何充分利用分布式并行计算技术也是实现预防控制和紧急控制一体化 OPS 的关键。

1 与 EMS 和安全稳定控制系统的接口

暂态安全预防控制和紧急控制一体化 OPS 的信息基础是整个互联电网当前的运行状态。由于互

联电网的调度运行实行的是分层分区原则,各级调度的 EMS 通常只采集其调度管理范围内的电网信息。因此,要掌握整个互联电网的运行状态,就必须综合各个(级)子网的 EMS 信息。

虽然 EMS 的就地静态量测量的精度高于安全稳定控制系统,但数据的同时性和实时性比安全稳定控制系统直接采集的局部运行信息差。另外,EMS 的可靠性也低于安全稳定控制系统。因此,在综合 EMS 数据和安全稳定控制系统的数据时,优先采用安全稳定控制系统的数据来反映系统的实际运行状态。

下面针对可能出现的 3 种情况,提出相应的处理方法。将 OPS 所在的子网称为内网,其他子网统称为外网,并约定安全稳定控制系统位于内网。设各子网的所有运行信息都能从该网的 EMS 获得。

1.1 无法获得外网 EMS 数据的情况

无法获得外网 EMS 数据时,内网是一个信息孤岛,只能将外网用某个适当的典型方式代替。外网的典型方式是在大量资料和运行经验基础上确定的。运行时,先根据时段等规则从多套外网典型方式中选择一套数据,再根据内网 EMS 状态估计后的数据与安全稳定控制系统数据匹配后的内外网联络线潮流结果,采用联络线功率方差最小规则来修改已选择的外网数据,用来代替外网 EMS 状态估计后的数据。最后把它与内网匹配后的数据合并在一起计算潮流,作为互联电网的实时运行状态。

当安全稳定控制装置的数据与 EMS 状态估计后的数据不一致时,对于可能采取措施的发电机出力,直接用安全稳定控制装置数据替换 EMS 数据;对于控制断面的潮流(有功和无功),通过以安全稳定控制系统数据为准的二次规划匹配,使其与安全稳定控制装置测量值尽量一致^[7]。可以将内网中的多个安全稳定控制系统看成一个区域安全稳定控制系统来处理。

1.2 可以获得部分外网 EMS 数据的情况

首先利用上述方法把内网 EMS 状态估计后的数据和安全稳定控制装置实测数据匹配在一起进行潮流计算,得到内外网联络线潮流结果。然后,根据各外部子网与内网的连接关系分别处理。

若该子网与内网没有直接连接,可采用包括内网与其他外部子网之间的联络线功率,以及该外部子网与其他外部子网之间的所有联络线功率方差最小的规则,修改外网的典型数据,从而得到整个互联电网的实际运行状态。

若该子网与内网有直接连接,同样可直接采用包括内网与该子网、内网与其他外网、该子网与其他

外网的所有联络线功率方差最小规则,一起修改其他外网的典型数据,从而形成整个互联电网的实际运行数据。

1.3 可以获得所有外网 EMS 数据的情况

首先把内网 EMS 状态估计后的数据和安全稳定控制装置实测数据匹配在一起进行潮流计算,得到内外网联络线潮流结果。然后,采用联络线功率方差最小规则来修改外网 EMS 状态估计后的数据。最后,再把匹配后的内、外网数据合并在一起计算潮流,作为互联电网的实时运行状态。

2 与其他系统的接口

OPS 的计算建立在系统运行状态、预想故障集、可选预防控制和紧急控制措施及代价等数据的基础上。这就要求匹配后的互联电网运行状态与实际运行状态的误差越小越好;预想故障集既要满足安全稳定规则的要求,又要包含概率高于某一门槛值的所有故障;可选的预防控制措施和紧急控制措施的代价函数应切实反映控制代价。因此,OPS 除了与 EMS 和安全稳定控制系统接口之外,还要与广域测量系统(WAMS)、雷电定位系统、气象信息系统、森林防火信息系统、设备状态监测系统、水情测报和水调系统及电力市场交易系统等接口,因为这些系统反映了电力系统运行的实际动态过程、自然环境和电力交易环境。

由于 WAMS 汇集的动态过程数据不仅带有统一时标,而且频率通常达到 25 Hz 以上,还包含所有重要发电机和变电站的数据^[12],因此,将 WAMS 数据、EMS 数据、安全稳定控制系统数据以及典型方式数据在反映系统暂态安全性方面的特点,集成在一起进行综合状态估计,可以提高系统运行状态的估计精度。文献[13]分析了相量测量装置(PMU)和监控与数据采集(SCADA)系统量测量的时延差对状态估计的影响,并提出了处理方法。

文献[14]设计了综合利用电网静态、暂态和动态信息的广域监测分析保护控制系统(WARMAP)。上述预防控制和紧急控制一体化 OPS 可以作为其一个应用。OPS 与 EMS、WAMS、水情测报和水调系统、电力市场交易系统、雷电定位系统、气象信息系统、森林防火信息系统和设备状态监测系统等的接口可以通过 WARMAP 实现。

依据雷电定位系统、气象信息系统、森林防火信息系统和设备状态监测系统等提供的信息,并结合系统的实际运行状态,计算出故障发生的概率,建立或修正在线预想故障集。依据水情测报和水调系统、电力市场交易系统等提供的信息,并结合系统的

实际运行状态,可以确定预防控制和紧急控制的可选措施及其代价。通过与 EMS 的自动发电控制 (AGC) 和自动电压控制 (AVC) 等系统接口,对 AGC 和 AVC 进行相应的改造,就可以把 OPS 给出的预防控制措施通过 AGC 和 AVC 实现闭环控制。当然,也可以由调度员下令执行预防控制措施。

3 预防控制和紧急控制一体化 OPS 框架

互联网预防控制和紧急控制一体化 OPS 框架如图 1 所示。该框架既可以单独进行预防控制在线预决策计算,也可以单独进行紧急控制在线预决策计算,以及二者协调控制的在线预决策。

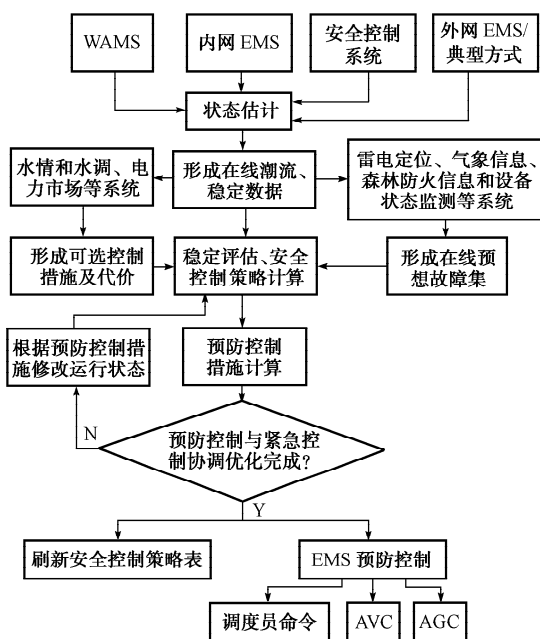


图 1 预防控制和紧急控制一体化 OPS 流程

Fig. 1 Flow chart of a unified OPS for both preventive and emergency controls

4 分布式并行计算平台的应用

电网互联使稳定计算的规模急剧增大,稳定问题更加复杂,暂态过程持续时间更长,要求时域仿真时间也要增大。控制手段的增加和通信技术的发展使更多的预防控制措施和紧急控制措施可供选择,大大增加了决策空间。暂态安全分析与控制中不仅要保证暂态功角稳定,而且要确保暂态电压和频率安全性。

以上因素造成单台商用计算机无法满足在线系统快速响应的要求。文献[10]提出用高可靠和高性价比的基于工作站机群和异步通信的分布式并行计算平台来满足在线系统的速度要求。

在分布式并行计算平台中,每台计算机称为一个节点,按任务通常可以分为管理节点和计算节点

2 类。管理节点负责计算任务的分发、计算结果的收集和整理以及对外接口。计算节点负责完成管理节点分发的计算任务,计算结果上送给管理节点。

暂态安全在线评估和紧急控制预决策面向的是特定的故障(算例),不同的算例之间完全独立。因此,可以将其逐个分发到空闲计算节点,计算节点把该算例的计算结果送回管理节点,直至所有算例计算完成,每个算例只传送一次。

预防控制在线预决策必须面向所有预想故障,采用上述每个算例只传送 1 次的并行计算方案无法解决预防控制在线预决策中经常会遇到的冲突。必须针对预防控制的特点,充分利用分布式并行计算平台的优点,整个计算过程分为以下 3 个步骤:

1)管理节点把所有算例逐个分发给计算节点,在计算节点上进行暂态安全裕度计算,并对安全裕度不足的算例进行紧急控制策略的优化计算,把计算的结果(裕度、安全模式、优化策略及其代价)上送管理节点。

2)在管理节点上根据所有算例的安全模式确定预防控制措施的试探值^[15,16],再把所有算例逐个分发给计算节点,在计算节点上进行施加预防控制后的暂态安全裕度计算,并对安全裕度不足的算例进行紧急控制策略的优化计算,把计算的结果(裕度、安全模式、优化策略及其代价)上送管理节点。

3)在管理节点上判断预防控制与紧急控制措施是否获得协调优化,并在必要时返回第 2 步。

5 应用实例

河南电网暂态稳定分析和紧急控制在线预决策系统 OPS-201 就是根据该框架和流程开发的。该系统先将河南电网 EMS 状态估计后的数据与禹州安全稳定控制系统的实测数据二者依据前述方法匹配,构成河南电网的运行状态,再与按联络线功率方差最小规则调整后的外网典型方式数据合并,作为在线稳定计算数据(目前是华中五省一市电网数据,也可以扩充为全国联网的数据),在线评估河南电网的暂态功角稳定性,并在线优化紧急控制决策,刷新禹州安全稳定控制系统的在线策略表。

河南 OPS-201 的分布式并行计算平台包括 1 个管理节点和 7 个计算节点。该系统具有非常高的可靠性和易扩充性,可根据对计算性能要求的提高而灵活增加计算节点。

该系统可选的切机措施为禹州电厂 2 台机,可选的切负荷点包括钧州、付庄、薛坡、淮阳和水寨共 5 个站,每个站的负荷分 3 轮切除,切机切负荷措施

组合共计 2 048 种。采用在线采集电网的拓扑变化修改离线预想故障表的方式获得在线分析故障集, 满足在 5 min 内完成一次约 100 个预想故障的稳定性评估和安全稳定控制系统覆盖范围内故障的优化控制策略制定的要求。该系统已于 2004 年 7 月投入试运行。

6 结语

在线暂态安全分析与控制预决策是互联电网调度运行、防御相继故障导致大停电事故的重要手段。根据实际系统的安全稳定特性, 研究面向安全稳定分析与控制在线预决策系统的信息配置技术, 综合运用 EMS、WAMS 和安全稳定控制系统等信息的状态估计技术, 以及在线预想故障集的制定技术、电力市场环境下的预防控制与紧急控制的在线协调技术、负荷模型和参数在线辨识技术, 是 OPS 实施中的一些关键问题。

目前国调、南方电网总调及许多网、省调都在着手规划建设在线暂态(动态)安全分析与控制系统。本文提出的暂态安全预防控制和紧急控制 OPS 中关于多个 EMS 和多个安全稳定控制系统的电网运行数据的匹配方法、在线预决策系统与调度中心其他系统的联系、基于分布式并行计算平台的互联电网安全稳定预防控制和紧急控制一体化 OPS 的框架等, 可供调度中心建设在线暂态(动态)安全分析与控制系统时参考。

参考文献

- [1] 白雪峰, 倪以信. 电力系统动态安全分析综述. 电网技术, 2004, 28(16): 14—20.
BAI Xue-feng, NI Yi-xin. Survey on Dynamic Security Assessment of Power Systems. Power System Technology, 2004, 28(16): 14—20.
- [2] XUE Yu-sheng, LUO Yu-sun, XUE Feng et al. On-line Transient Stability Assessment in Operation—DEEAC in Northeast China Power System. In: Proceedings of 10th IEEE Region Conference on Computer, Communication, Control and Power Engineering. Beijing (China): 1993. 72—76.
- [3] CIGRE Working Group. Assessment of Practical Fast Transient Stability Methods. 38.02.09 Report. 1992.
- [4] XUE Yu-sheng. An Emergency Control Framework for Transient Security of Large Power Systems. In: Proceedings of International Symposium on Power Systems. Singapore: 1993.
- [5] OTA H, KITAYAMA Y, ITO H et al. Development of Transient Stability Control System Based on On-line Stability Calculation. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1463—1472.
- [6] 方勇杰, 范文涛, 陈永红, 等. 在线预决策的暂态稳定控制系统.

电力系统自动化, 1999, 23(1): 1—7.

FANG Yong-jie, FAN Wen-tao, CHEN Yong-hong et al. Transient Stability Control System with On-line Pre-decision. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(1): 1—7.

- [7] 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. 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 System. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(24): 1—2, 16.
- [8] FANG Yong-jie, XUE Yu-sheng. An On-line Pre-decision Based Transient Stability Control System for the Ertan Power System. In: Proceedings of International Conference on Power System Technology (POWERCON'02), Vol 1. Kunming (China): 2002. 287—292.
- [9] 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. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 45—47, 74.
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 Systems. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 45—47, 74.
- [10] 许剑冰, 薛禹胜, 徐泰山, 等. 在线动态安全评估的实用方法及工业应用. 见: 2004 全国电力系统自动化学术交流研讨会. 桂林: 2004.
XU Jian-bing, XUE Yu-sheng, XU Tai-shan et al. Practical Methodologies for On-line Dynamic Security Assessment and Industrial Applications. In: Proceedings of Symposium of the CSEE on Electric Power System. Guilin (China): 2004.
- [11] 薛禹胜. 暂态稳定预防控制和紧急控制的协调. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 1—4, 9.
XUE Yu-sheng. Coordinations of Preventive Control and Emergency Control for Transient Stability. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(4): 1—4, 9.
- [12] 许剑冰, 薛禹胜, 张启平, 等. 基于系统同调性的 PMU 最优布点. 电力系统自动化, 2004, 28(19): 22—26.
XU Jian-bing, XUE Yu-sheng, ZHANG Qi-ping et al. Coherency Based Optimal Placement of PMU with Stability Observability. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19): 22—26.
- [13] 赵红嘎, 薛禹胜, 高翔, 等. 量测量的时延差对状态估计的影响及其对策. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 12—16.
ZHAO Hong-ga, XUE Yu-sheng, GAO Xiang et al. Impacts of the Difference Between Measurement Transmission Delays on State Estimation and the Countermeasures. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 12—16.
- [14] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架: (一) 从孤立防线到综合防御. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 8—16.
XUE Yu-sheng. Space-time Cooperative Framework for Defending Blackouts: Part I Form Isolated Defense Lines to Coordinated Defending. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8—16.

(下转第 36 页 continued on page 36)

- [15] 薛禹胜,李威,HILL D.J. 暂态稳定混合控制的优化(一):单一失稳模式的故障集. 电力系统自动化,2003,27(20):6—10.

XUE Yu-sheng, LI Wei, HILL D.J. Optimal Hybrid Control of Transient Stability: Part One For Case with a Unique Unstable Mode. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 6—10.

- [16] 李威,薛禹胜,HILL D.J. 暂态稳定混合控制的优化(二):不同失稳模式的故障集. 电力系统自动化,2003,27(21):7—10,29.

LI Wei, XUE Yu-sheng, HILL D.J. Optimal Hybrid Control of Transient Stability: Part Two For Case with Different Unstable Modes. Automation of Electric Power Systems,

2003, 27(21): 7—10, 29.

徐泰山(1968—),男,博士,高级工程师,主要从事电力系统安全稳定分析与控制的研究与应用。E-mail: stc@nari-china.com

许剑冰(1970—),男,高级工程师,主要从事电力系统安全稳定分析与控制的研究与应用。

鲍颜红(1971—),男,工程师,主要从事电力系统安全稳定分析与控制的研究与应用。

On-line Pre-decision Based Preventive and Emergency Control System for Interconnected Power Grids

*XU Tai-shan¹, XU Jian-bing¹, BAO Yan-hong¹, FANG Yong-jie¹, LI Bi-jun¹, XUE Yu-sheng¹,
YAN An-he², SUN Han-xiao²*

(1. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

(2. Henan Electric Power Dispatching and Communication Center, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Power grid interconnection and power industry deregulation bring challenges to the secure and economic operation of power systems. The importance of on-line transient security analysis and control for interconnected power grids is expounded. It is stressed that not only angle stability, but also voltage and frequency security should be considered in on-line pre-decision system (OPS) for interconnected power grids. And the preventive and emergency control should also be arranged in a coordinated framework. The relationship between the integrated OPS and the other systems in power dispatching center is discussed, and the data sharing among several energy management systems (EMSs) and several stability control systems is also discussed. Moreover, the corresponding framework is presented, and the distributed parallel calculation techniques are adopted to improve the system's rapidity and reliability. Finally, an application example and some key implementation issues are presented and discussed.

This work is supported by the Grand Project of National Natural Science Foundation of China (No. 50595413) and State Grid Corporation of China (No. SGKJ[2004]392).

Key words: preventive control; emergency control; on-line pre-decision system; interconnected power grid; transient security