

电网控制中心安全预警和决策支持系统设计

张伯明¹, 吴素农², 蔡 斌², 吴文传¹, 孙宏斌¹, 郭 琦¹

(1. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京市 100084; 2. 江西电力调度中心, 江西省南昌市 330077)

摘要: 提出电网控制中心安全预警和决策支持系统按时间、空间和对象等 3 个维度进行设计。在时间维上, 将电网事故看做事件的发展过程, 分析中考虑电网暂态、动态和稳态等状态变化; 在空间维上, 考虑电网调度管理体制的分层分区, 电网分析应分解协调进行; 在对象维上, 既考虑功角稳定和电压稳定, 又考虑安全和经济。文中描述了系统的总体设计框架和功能, 论述了系统的特点, 给出了部分计算结果。

关键词: 控制中心; 能量管理系统; 安全分析; 电压稳定分析; 安全预警

中图分类号: TM734

0 引言

电力系统的安全运行历来是电力调度部门最为关心的问题。2003 年发生在美加“8·14”大停电事故至今记忆犹新。该事故的最终调查报告指出, 其重要原因是 MISO (midwest independent system operator) 的能量管理系统 (EMS) 的状态估计失效, 不能进行事故前的预警和静态安全分析; 第一能源公司 (FE) 的 EMS 的报警功能也出了问题, 调度员没有察觉已经和正在发生的事故^[1]。因此, 作为电网安全运行的神经中枢和调度指挥司令部的调度中心, 需要高度自动化和智能化的安全预警和决策支持系统。

传统的 EMS 作为电网调度中心在线分析的重要工具, 在辅助调度员决策方面起到了重要作用, 是调度中心不可缺少的工具。但是, 虽然传统的 EMS 使用在线数据进行分析 and 计算, 但其网络分析功能的应用模式主要还是调度员请求才执行, 侧重研究模式, 缺少自动跟踪电网运行状态、自动诊断电网问题、根据问题自动给出控制或调整建议的功能。另外, 传统的 EMS 侧重在线稳态分析, 缺少在线暂态分析功能, 也缺少电压稳定分析功能; 而稳定分析是由运行方式人员离线计算完成的, 其结果往往偏于保守。因此, 传统的 EMS 不能满足对电网进行全面安全预警和决策支持的要求^[2,3]。

为了实现全面的电网安全预警和决策支持, 国内外正在开展相关的研究工作。例如, 文献^[4]报道

了 Siemens 公司和美国电力科学研究院 (EPRI) 在北美电力的在线 EMS 上实现动态安全分析 (DSA) 的在线计算。这个 DSA 系统使用 EPRI 的暂态稳定分析程序, 从 EMS 获取实时数据, 但它是独立于 EMS 运行的。文献^[5]报道了 BPA 的研究计划, 用 2 台 PC-NT 离线计算电压稳定, 他们正在进行在线计算可用传输容量 (ATC) 项目, 并计划在多区域状态估计运行正常后实施在线 DSA。欧共体实施的 OMASES (open market access and security assessment system) 项目的研究内容包括了在线 DSA 和电压稳定分析 (VSA), 并取得了部分成果^[6]。巴西的国家电力调度中心 (ONS) 将传统的离线程序改造成自动运行方式, 实现在线 DSA^[7]。该系统独立于 EMS, 使用 Windows 平台和独立的人机界面。最近召开的国际特大电网运行会议第 3 工作组指出, 目前还没有在调度室内使用的具有实时分析功能的 DSA 仿真工具^[8]。

国内也有不少相关的研究工作发表^[9], 在紧急控制方面甚至已经走在国际前列。但是在调度中心 EMS 上真正实施具有在线跟踪、自动智能、综合协调特点的电网安全预警和决策支持系统的应用成果尚未见报道。

本文在空间、时间和控制目标 3 个维度设计了控制中心的在线安全预警和决策支持 (EWSC——early warning and security countermeasure) 系统。适应物理电网中的从故障到事故再到停电的系列事件发展过程的特点, 实现在线跟踪、自动智能、综合协调的决策支持。本文按照电网运行状态变化的演进过程进行功能设计, 给出了该系统的软硬件设计, 最后给出利用省级电网的实时数据进行分析计算得出的部分结果。

1 基于3个维度的概念设计

电力系统是世界上目前所知最大的人造物理系统之一。利用目前的技术条件,人们还无法对这样复杂的物理系统进行直接的控制,通常采用在线跟踪仿真的方法,建立物理系统的数学模型,采集物理系统的实时数据,在数字系统上仿真物理系统的变化过程,利用仿真结果指导对物理系统的调度和控制。

这就要求数字系统的数学模型能真实反映物理系统的变化,并要求从物理系统采集的实时数据真实可靠,还要求数字仿真的速度能适应物理系统的变化,满足决策控制的实时性要求。传统的 EMS 可以满足电网稳态分析和决策的实时性要求,但不满足稳定分析(涉及微分方程)的要求。稳定分析过去只能离线进行,其结果供在线使用。这种做法并不科学,其结果偏于保守。随着信息技术的发展,在线进行动态安全稳定分析逐渐成为可能。

就目前技术水平而言,将电网稳定分析计算的结果直接用于控制尚无可能,通常的做法是利用电网实时数据进行稳定分析和决策的计算,用以指导电网运行方式的调整,进行预防控制。由于实时数据紧随电网运行状态的变化,并最多以数秒级滞后来反映电网发生的事件,所以,这种实时跟踪计算从概念到执行模式上已和过去的离线计算有本质的不同。

本文提出的 EWSC 系统就是基于这个前提条件设计的。EWSC 系统要为电网的安全运行服务,就需要符合物理电网的运行特点。而物理电网的运行特点可以从3个维度来分析,因此,本文在时间、空间和对象等3个维度上进行 EWSC 系统的概念设计。

1.1 时间维

电网事件引发的物理过程,其变化在时间维度上可划分为极快速的电磁暂态、快速的机电暂态、相对慢速的准稳态到稳态。电网中不同事件引发的电网状态的变化在时间上也是一个状态转移的过程,传统的 $N-M$ 开断是离线分析的概念,用于在线并不科学,并非一次同时发生了 M 个开断,而是在时间序列的不同时刻相继发生了 M 次单开断,这一过程可能持续数分钟乃至数小时。例如,“8·14”美加大停电直接相关的开断的发展过程就持续了近2 h。因此,就电网单个事件而言,在时间维度上分析有一个从“暂态、准稳态到稳态”的变化过程,而几个不同事件序列的发展过程在宏观上又可以看做是从一个稳态到另一个稳态,连锁序列开断就是这种情况。

事件发生的顺序不同可能导致的结果有本质不同。正因为物理过程在时间上有快慢之分,事件序列在时间上有先后之分,因此,EWSC 系统的设计要能“实时”、“跟踪”、“递归”地反映不同事件之间的变化,而不是像离线分析那样一次考虑多重故障、多重开断。在一个事件引发的物理过程的分析中既要考虑稳态分析和决策(代数方程),也要考虑动态分析和决策(微分代数方程)。

1.2 空间维

电网在地理位置的空间上互联为一体,并按照其本身的物理规律变化;而由于管理体制等原因,对电网的分析和控制决策却是分区的,是分别、独立进行的。这存在矛盾。过去,人们试图解决这个矛盾,例如对外网进行等值。限于技术条件和管理条件,过去的外网等值往往是一次离线做好,长时间使用;甚至人工处理,简单等值;甚至更简单地直接挂一个等值机。这种做法其结果的可信度很差。为得到全网一致的计算结果,人们试图采用全网数据离线进行运行方式的计算,认为计算用的电网越大,计算结果越符合实际。这在离线计算也许可行,但是在线应用无法实现。不只是计算规模太大导致计算量太大,更致命的困难是,很难建立和维护自己管辖区域以外的电网模型,也很难采集和传送管辖电网以外的实时数据,在电力市场环境下更是如此。因此,在区域电网内如何建立 EWSC 系统的电网模型,是无法回避的问题。空间上分布的各个区域调度中心既要同时、分别、独立进行自己电网的计算,又要与上级调度中心交换必要的最小量信息,使得自己独立进行的计算和全网统一建模的计算结果一致。

1.3 对象维

EWSC 系统要分析的物理对象复杂,涉及机、电、磁等物理量,分别代表了物理对象不同的物理表现。电网运行中,既关心频率问题、功角问题、无功电压问题,也关心安全问题、经济问题等。因此,需要按待分析问题的对象来划分,设计相应的功能。

2 EWSC 系统的总体设计

按照以上概念设计,本文提出的 EWSC 系统在时间维上实时跟踪电力系统运行状态的变化,按 Dy-Liacco 提出的紧急状态、正常不安全状态和正常安全状态(恢复状态不属于本文的研究内容),根据电网当前运行状态进行相应的预警和决策,流程框图见图1。

首先,EWSC 系统从控制中心 SCADA/EMS 中获取当前的实时数据,然后对该数据进行估计、辨

识等数据处理工作,这一过程称为数据重建,其结果为后续的分析决策提供正确、可靠的实时潮流断面。然后,对当前系统的运行状态进行评估。如果系统存在违限,表明系统现已进入紧急状态,立即报警,并给出解除违限的校正控制决策建议。如果当前系统处于正常状态,即不存在任何违限,继续分析系统是否安全。如果当前系统不能承受 $N-1$ 开断事故,说明当前系统是正常不安全的,这时 EWSC 系统给出分析报告,指出哪个开断引起系统产生何种不安全,并给出解除这种不安全的建议对策。如果系统处于正常安全状态,则考察系统离不安全的距离,如果该距离较小,说明开断虽然没有引起系统元件发生违限,但部分元件接近违限,EWSC 系统给出增强系统安全的对策报告,即给出建议的调整方案,使系统远离不安全。在正常安全状态下,我们有足够的时间进行调整,优化电网的经济运行。

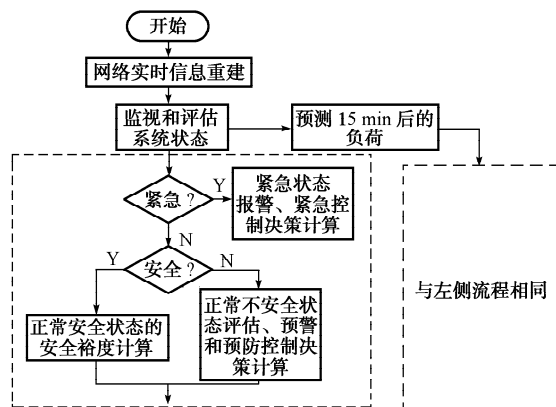


图1 EWSC系统的总体流程

Fig. 1 Configuration of EWSC system

上述都是在当前潮流断面上进行的分析和决策。为了给调度人员足够的时间应付可能即将出现的紧急情况,这些分析需要在预测的潮流断面上进行,即同时进行 15 min 后的系统超短期负荷预测和节点负荷预测,在预测潮流基础上进行与图 1 左侧虚线框内相同的计算。

EWSC 系统的功能如下。

2.1 紧急状态报警及校正对策

需要报警和校正的违限包括:输电设备热稳定极限;电压幅值极限;基于暂态稳定的输电线路传输功率极限;系统所有元件的最小 CCT 限值;电压稳定极限;综合可用传输容量极限;等等。

2.2 正常不安全状态下的安全稳定分析、预警和预防控制对策

需完成的功能有:电网 $N-1$ 事故扫描、排序、筛选;计算各种安全性指标;对严重的事故进行安全评估;对引起安全问题的事故进行预防控制决策计

算。这里需要考虑静态安全、动态安全、功角稳定安全、电压稳定安全等。

2.3 正常安全状态下的安全裕度计算和增强控制对策

需要完成的功能有: $N-1$ 开断情况下的安全裕度计算;对不同侧面评定电网抗扰能力的指标;改进电网经济性能的调整对策;继电保护定值扫描计算;等等。这里需要考虑静态安全裕度、动态安全裕度、功角稳定裕度、电压稳定裕度等。

2.4 预报模式下的分析

图 1 中左侧虚线框中的功能也同时在右侧方框中运行,但是使用的是超短期负荷预报给出的数据,即预报出 15 min 以后的系统负荷,并将系统负荷按一定的分配因子分配给各个母线,并计算出该负荷下的潮流分布,在此基础上进行所有前述的分析。在负荷增长较快的时段,在预测潮流下及时进行预警分析和控制决策,对调度员提前做好调控准备有重要意义。

3 硬件系统设计

本系统采用 8 台微机组成集群采用物理并行的方式来实现本文的主要功能。其中:1 台为协调机,进行计算任务的分配;7 台为计算节点机,每台承担给定的计算任务。另外,各个科室可以通过各自的人机界面(MMI)访问本系统。

4 软件系统设计

采用 UML 进行软件系统设计,用 IEC 61970 CIM/CIS 作为与外部 EMS 接口;使用 Qt 开发平台,使系统可以跨平台在 UNIX 或 NT 上运行。在协调机上开发了任务调度程序自动在集群微机之间分配计算任务。

候选事故集的设计至关重要,本文将事故分解为基本元件故障、基本故障序列和故障切除控制序列等,经组装成为每个具体的预想事故。利用这个工具,用户可以像搭积木一样自行构建复杂的故障序列。

5 系统特点

1)实时、在线:所有的分析和决策都使用实时数据在线进行,包括动态安全分析。

2)递归、跟踪:时刻跟踪事件引起电网状态的变化,上一时刻电网变化的结果是这一时刻分析计算的初值,分析和决策递归跟踪进行。

3)自动、智能:系统周期定时启动,并可事件驱动启动,自动给出决策结果,无需人工干预。自动抽出表征电网安全性能的各种标量指标,定性和定量地给出电网状况的综合评估报告。

4)综合、协调:安全评估综合考虑了静态、动态和电压稳定安全问题,给出的预防控制对策协调考虑了运行可行域、动态安全域和电压稳定安全域^[10]。

5)预警、预防:可评价当前电网运行状态下的潜在安全问题,也可预测未来电网运行状态下的不正常和潜在安全问题的发展趋势,给出相应的预警报告和预防控制对策。

6 部分计算结果

本系统自动连续运行,时刻跟踪电网运行状态的变化。这里给出的是某省电网实时跟踪计算得到的结果。另外,除了常规 EMS 的实时网络分析功能之外,本系统还能在线完成多项新功能。例如,在线静态电压稳定分析方面,能给出每天 24 h 的最小奇异值随时间的变化曲线,如图 2 所示。由图可见,在上午和下午 2 个高峰负荷时段最小奇异值曲线出现 2 个低谷区,它们是静态电压稳定水平较低的时段。

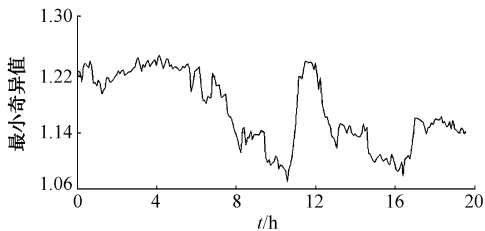


图 2 系统最小奇异值随时间的变化曲线
Fig. 2 Minimum singular value vs time

本系统还能给出综合考虑静态、动态和电压稳定安全问题的输电断面最大传输容量(TTC)随时间的变化曲线,如图 3 所示。图 3 中,下面一条曲线是实时测量的断面传输功率曲线,上面一条曲线是计算出来的当时的 TTC 值。可见,断面传输功率大的时候,TTC 的值反而小,此时电网输电容量裕度较低,电网的抗扰能力较差。

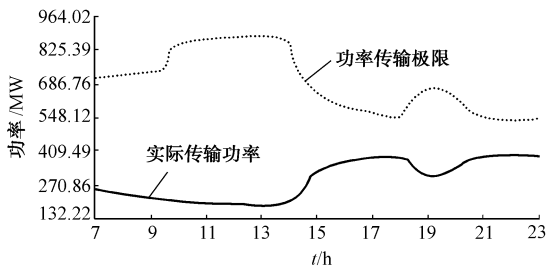


图 3 联络线断面 TTC 随时间的变化曲线
Fig. 3 TTC for flow gate MW vs time

通过执行本系统给出的预防控制策略可以提高电网的抗扰能力。以图 4 为例。图 4 横坐标是故障

序号,纵坐标是某故障对应的极限切除时间(CCT)。图 4 下面一条是控制前的故障对应的最小 CCT 值的升序排序曲线,它是通过在线暂态稳定分析计算出来的;上面一条是控制后的 CCT。由图 4 可见,通过对某些机组的出力再分配,在同样满足负荷需求的情况下,CCT 增大了,曲线抬高了,说明电网总体暂态稳定水平提高了。当然,这只是相对意义下的结论。

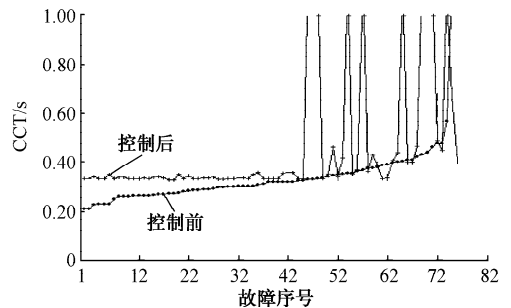


图 4 系统最小 CCT 在控制前后的变化
Fig. 4 Minimum CCTs before and after control

为说明本系统的综合安全预警能力,图 5 给出了某省级电网增加 500 kV 联络线断面的输送功率的仿真计算结果。图 5 横坐标是联络线输送功率,纵坐标是监视点电压。其中实线是当前情况下计算出的鼻值曲线,断面传输极限值较高;虚线是一个关键故障 F 引起故障线路开断后电网的最大传输功率鼻值曲线,最大传输功率值下降;点线标出在当前电网运行情况下,关键故障 F 发生时,在给定的故障切除时间下电网能维持暂态稳定的最大传输功率,可见该值要小得多。综合考虑静态电压稳定、N-1 电压稳定和故障后维持暂态稳定,需要控制的联络线断面潮流不应大于图 5 中的暂态稳定限。

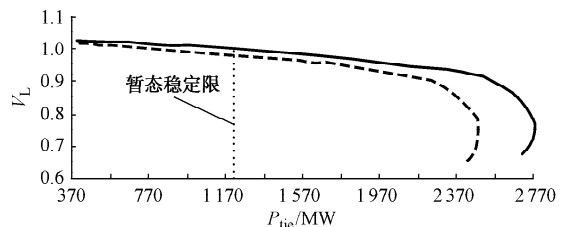


图 5 某输电断面传输极限的计算结果
Fig. 5 Transmission limit for a flow gate

7 结语

本文提出按照时间维、空间维和对象维等 3 个维度设计电网 EWSC 系统。该系统的设计理念与传统的 SCADA/EMS 有本质的不同,如果说传统 SCADA 侧重“监视”而非“分析”,EMS 侧重“分析”但却是以调度员为主体由调度员请求来分析,则本

EWSC 系统则是侧重“自动”、“智能”,由计算机主动分析和自动决策。本文提出的 EWSC 系统在线运行,实时跟踪电网运行状态的变化,在电网的变化过程中,自动递归地对当前的电网进行评估、预警和决策,同时能预测电网的变化趋势,提前给出预警报告。与以往分别、独立的分析计算模式不同,EWSC 系统从电网全局的角度研究问题,注重关联、协调,包括时间、空间和控制对象等三者每一个的内部和三者相互之间的协调,构成了电网安全防护的有机整体。本文同时给出了该系统开发过程中的部分结果,证明 EWSC 系统可以给电网调度人员提供更多的信息,提供更高水平的决策支持。

参考文献

- [1] US-Canada Power System Outage Task Force. Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations. <https://reports.energy.gov/>, 2004.
- [2] 张伯明. 现代能量控制中心概念的扩展与前景展望. 电力系统自动化, 2003, 27(15): 1—6.
ZHANG Bo-ming. Concept Extension and Prospects for Modern Energy Control Centers. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(15): 1—6.
- [3] 孙宏斌, 胡江溢, 刘映尚, 等. 调度控制中心功能的发展——电网实时安全预警系统. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 1—6.
SUN Hong-bin, HU Jiang-yi, LIU Ying-shang et al. Evolution of Power Dispatch Control Center——Real-time Power Security Early Warning System. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 1—6.
- [4] EJEBE G C, JIN C, WAIGHT J G et al. Online Dynamic Security Assessment in an EMS. IEEE Computer Applications in Power, 1998, 11(1): 43—47.

- [5] TAYLOR C W. The Future in On-line Security Assessment and Wide-area Stability Control. In: Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol 1. Singapore: 2000. 78—83.
- [6] DEMARTINI G, MASSUCCO S, WIEHENKEL L. Open Market Access and Security Assessment System. In: Proceedings of 7th International Workshop on Electric Power Control Centers. Ortisei (Italy): 2003.
- [7] JARDIM J L, NETO C S, KWASNICKI W T. Design Features of a Dynamic Security Assessment System. In: Proceedings of Power Systems Conference and Exposition, Vol 1. New York (NY, USA): 2004. 446—452.
- [8] LEMAITRE C. Advanced Decision Support Tools. In: Proceedings of International Meeting of Very Large Power Grid Operators (VLPGO). Shanghai (China): 2005.
- [9] 薛禹胜. EEAC 和 FASTEST. 电力系统自动化, 1998, 22(9): 25—30.
XUE Yu-sheng. EEAC and FASTEST. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(9): 25—30.
- [10] 郭琦. 电力系统综合安全预警与协调预防控制研究: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2005.
GUO Qi. An Research on Comprehensive Security Early Warning and Coordination Preventive Control in Power Systems, Doctoral Dissertation. Beijing: Tsinghua University, 2005.

张伯明(1948—), 男, 教授, 博士生导师, CSEE 和 IEEE 高级会员, 从事电力系统分析、控制中心计算机应用的教学和研究工作。E-mail: zhangbm@mail.tsinghua.edu.cn

吴素农(1964—), 男, 高级工程师, 总工程师, 主要从事电网调度运行技术管理、科技管理和人员培训等工作。

蔡斌(1950—), 男, 高级工程师, 主任, 主要从事电网运行管理工作。

Design of an Early Warning and Security Countermeasure System for Electric Power Control Centers

ZHANG Bo-ming¹, WU Su-nong², CAI Bin², WU Wen-chuan¹, SUN Hong-bin¹, GUO Qi¹

(1. State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. Dispatch Center of Jiangxi Power Grid, Nanchang 330077, China)

Abstract: An early warning and security countermeasure (EWSC) system is proposed in this paper. This EWSC system is designed according to three-dimension analysis. In time dimension, a contingency is considered as a time evolution process of a sequence of events and the analysis is done by transient, dynamic and steady states separately and comprehensively. In space dimension, hierarchical dispatch and control are considered and the decomposition and coordination between control centers are carried out in the network analysis of the EWSC system. In objective dimension, phase angle security vs voltage security and security vs economy, are all considered. Overall design of the EWSC system is given and the exclusive features of the system are described. Some extensive calculation results obtained by the EWSC system are reported.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217904) and National Natural Science Foundation of China (No. 50595414).

Key words: control center; energy management system; security analysis; voltage stability analysis; security early warning