

# 大型互联电网运行状态感知与调度辅助决策支持技术

提出了一种面向调度实时监控的风险感知与事故处理辅助决策支撑框架,通过调控中心多源信息的挖掘实现电网事故风险的感知,通过电网事故的在线监视、分析、评估和辅助决策处理机制,实现电网事故风险的全流程处理,通过信息综合、应用综合以及分层展示、多主题窗口的可视化展示技术提高调度事故处理效率,帮助调度员从电网运行全局出发掌控电网运行。

陆进军 闪鑫 王波/国电南瑞科技股份有限公司

## 0 引言

电网互联在实现能源资源的全局优化配置、提高电网运行的经济性以及大规模新能源的接纳和输送能力方面具有显著的优势,已成为地区输电网未来发展的重要方向。“十二五”规划纲要明确指出:“要适应大规模跨区输电和新能源并网发电的要求,加快现代电网体系建设,进一步扩大西电东送规模,发展特高压等大容量、高效率、远距离先进输电技术”。印度、拉美、欧洲等国家和地区也都根据本地区经济和社会发展需要制定了相应的电网互联规划<sup>[1-3]</sup>。

但是,互联也会给电网的运行、控制带来不利影响。与小电网相比较,由于大电网覆盖地域广,网络结构复杂,不确定性增加,电网运行更易受事故和外界因素影响,极端气象条件、连锁性事故反应等常常是造成大型互联电网灾难性事故发生的原因所在。美加大停电

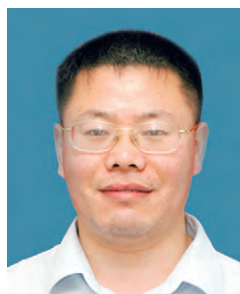
(引用)、欧洲停电、巴西停电等一系列事故调查报告<sup>[4-7]</sup>的分析结果也表明,缺乏大电网运行的广域信息支撑、状态感知(事前风险感知及评估)、协调控制和紧急事故处理能力,是导致停电事故扩大的重要原因。因此,该方面的研究具有较高的理论和工程应用价值,并得到了许多研究机构和人员的关注。文献[8-13]研究并提出了大电网风险评估的策略和方法,文献[14]研究保护和自动装置配置对电网连锁事故风险的影响,文献[15-17]则对大电网连锁性事故产生的机理进行了研究,文献[18-23]研究了大电网连锁性事故风险的监视、分析和恢复方法。这些研究都从不同的侧面提出了适应于大电网互联发展形势的电网安全评估、监视、分析和恢复控制方法,但在理论和实践应用方面还未成熟,尚需进一步研究。

本文拟从工程实践角度出发,围绕大型互联电网的运行和调控需求,建立集广域信息共享、运行风险感知、在线事故分析、评估及辅助决策处理等功能于一体的事故风险处理框架,提高电网的综合防范能力。

## 1 实现方案

### 1.1 基本思路

大电网事故风险防范的关键在于建立电网事故风险的流程化处理机制,实现电网事故风险的事前感知、在线监测、分析、评估和辅助决策处理,增强调度的应急反应和事故处理能力。其基本架构如图1所示。



陆进军/高级工程师

### 关键词/Keywords

风险感知·  
事故处理·  
评估·  
辅助决策·  
可视化·

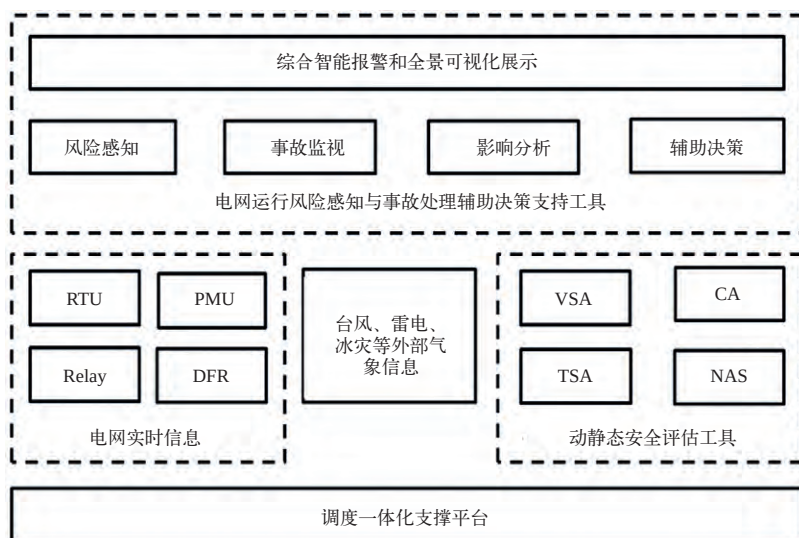


图1 大电网事故风险防范框架

底层为调度支撑平台，为上层应用提供通用的模型、图形、数据存储和网络通信等服务。信息层汇集调控中心的各类数据资源，包括暂态、稳态和动态数据，开关和保护动作信息等，为事故风险感知和在线监视提供基础数据，动态信息、模型信息等则为事故处理和协调控制提供基础数据。基本应用层提供通用的网络分析、暂态安全评估、电压安全评估和静态安全分析等功能，基于SOA开发，按需调用，为辅助决策和综合智能报警提供分析结果。高级应用层利用信息层提供的各类数据资源以及基础应用层提供的通用服务实现电网事故风险的感知、监视、分析、评估和辅助决策处理。

### 1.2 状态感知

风险感知是为了在事故发生之前及早辨识电网运行风险，并采取针对性措施避免事故发生或防止事故范围扩大，变“事后被动处理”为“事前主动防御”。为实现电网运行风险感知，需汇集调度中心各类数据资源，以电网当前运行状态为基础，结合负荷预报、调度计划、新能源发电预测以及外部气象条件等，在线辨识电网运行的内外风险因素，包括电网运行备用（容量和旋转）、设备检修和不合理的运行方式、极端气象条件（如强台风、冻雨、冰灾等）、低阻尼功率振荡、持续性低电压及潜在设备风险等，如图2所示。

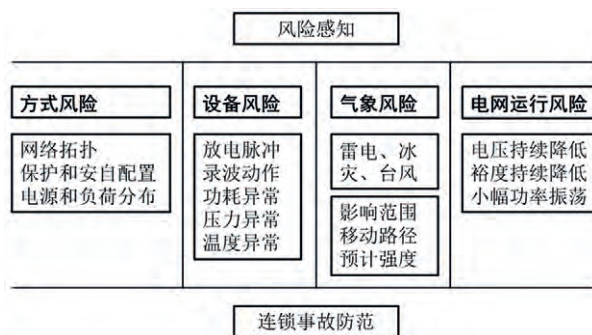


图2 电网运行风险感知

通过多方位的风险感知，可以在电网事故发生或变得不可控之前就能根据调控中心各类一次和二次量测信息的变化，采用智能推理和关联分析技术，从中分析出可能导致事件恶化的关键环节，并提前采取防御措施，避免大面积停电事故的发生。

### 1.3 事故分析

事故分析用于电网事故的在线监视、分析和影响评估（如图3所示），提示调度电网中当前正在发生的事故类型、设备和影响范围，提示调度员及时处理，并自动产生事故简报，方便调度查阅和处理电网事故。

事故发生时，电网中的电压、电流和有功等会发生突然变化，并进一步引起保护和开关动作，电网中的故障录波等装置也会记录下相应的电压、电流波形，为事故的监视、诊断提供了丰

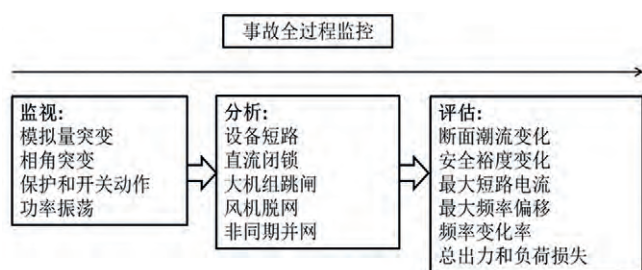


图3 事故全流程分析

富的数据源。事故诊断基于逻辑推理和关联分析，根据事故过程中设备量测突变以及相关的开关和保护动作信息进行综合判断，提高在线分析的速度和正确性。事故类型包括电网短路、大机组跳闸、直流闭锁、非同期并网和风机脱网等。事故评估侧重于对事故影响的分析，包括最大短路电流，最大频率变化及其变化率，事故前后安全裕度指标和断面潮流变化等，帮助调度员快速掌握事故处理要点。

#### 1.4 二次设备响应评估

响应评估主要用于电力二次设备的动作评价，分析设备在电网扰动过程中能否按预定要求动作，是否存在反向动作（逆调节）或误动作等，为装置选型、算法改进、参数优化等提供依据，如图4所示。

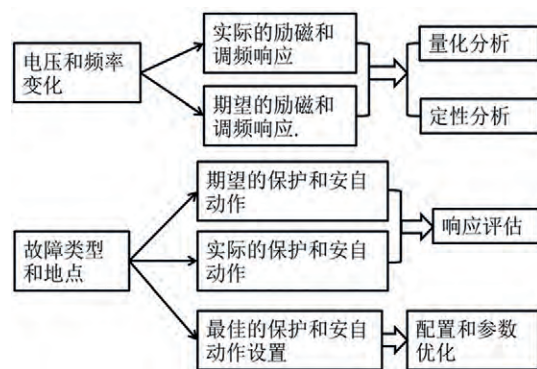


图4 二次设备响应评估

保护和安自装置动作行为作评价；①根据事故类型、地点以及保护和安自装置配置信息，分析其预期动作行为，并与其实际动作行为相比较，以评估二次设备动作的正确性。②根据事故类型和地点，分析其理想动作状态，以校核二次设备参数配置的合理性，为进一步优化参数设置提供依据。

机组调频及励磁调节响应行为评价：根据事故过程中电网电压和频率变化情况，分析机组调频和励磁装置是否按预期响应动作，能否维持电网电压和频率的稳定，并给出定性和量化分析指标，为改进机组调频和励磁调节响应性能提供依据。

#### 1.5 辅助决策

电网事故处理的要点是从全局角度把握事故本质、影响范围及事故后电网运行关键，并采取正确措施，消除潜在的不安全因素，避免连锁性事故的发生。为此，必须建立电网事故处理的综合评估、辅助决策和广域全景信息展示机制，如图5所示。

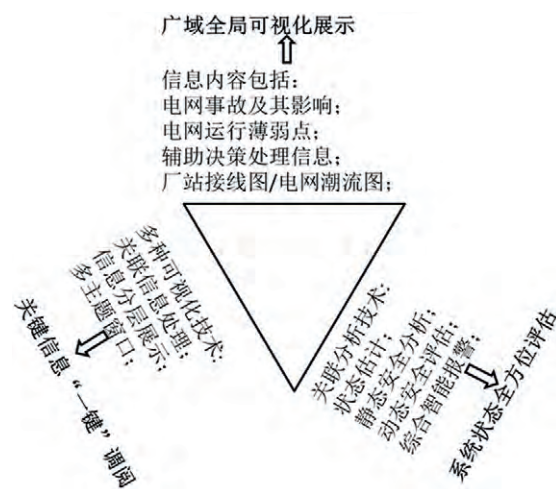


图5 辅助决策“三要素”

评估主要是针对当前或事故后电网运行状态，从拓扑、备用、电压、频率、功角等动态和静态安全裕度指标方面进行量化分析，以指示风险程度。辅助决策是根据系统当前状态、事态发展趋势和可用资源进行，寻找可行的事故风险消除方法，以指导调度员快速处理，防止事故进一步恶化。广域全景信息展示则为调度员获取和评估电网运行状态信息、局部风险或事故详情、辅助决策建议以及调度处理措施等提供了技术手段。事故评估和辅助决策以关联分析和流程化控制技术为基础，如图6所示。

由于现代互联电网的结构日趋复杂、规模越来越大、覆盖的地理范围广阔等特点，系统的控制难度较大，必须提高事故处理的效率，避免

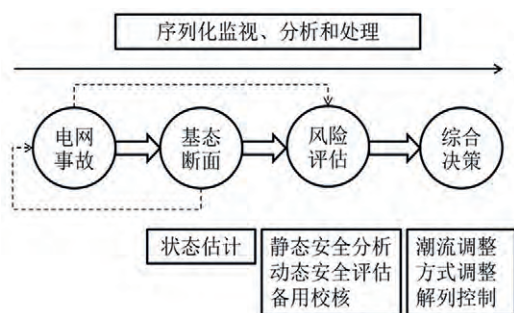


图6 事故处理流程化控制

事态的进一步恶化。传统人工驱动型的分析方法很难满足要求，必须建立事件驱动型的分析和调度机制，在电网发生事故时能自动执行相关的分析，并给出事故处理决策建议，供调度参考。

广域全景信息展示以电网接线图或地理潮流图为基础，采用信息关联、分层展示、多主题窗口的可视化展示技术，实现电网整体运行状态的概览，以及局部事故或风险的“一键式”调阅，有助于提高调度员的应急反应和驾驭电网运行的能力。

## 2 实际应用情况

基于上述一体化设计思想的大电网在线风险评估及事故处理辅助决策系统已经在多个网省级调度中心投入应用，并建立了与气象信息系统、雷电监测系统、冰灾监测系统和直流系统协调控制系统等之间的接口，为调度中心在线获取和分析外部风险因素提供了信息基础。

针对东南沿海地区5~10月期间台风较为集中的特点，建立了针对气象风险的在线感知和实时预警机制，及时跟踪台风路径和强度的变化，提示调度监控要点，并给出事故情况下的辅助决策建议，提高电网整体运行的安全性。

针对近年来直流输电技术应用越来越多，输电容量越来越大，电压等级越来越高的发展现状，建立了针对直流闭锁的在线监视、分析和辅助决策处理机制，一旦系统中发生大容量直流系统单极或双极闭锁，立即报警并给出电网中潮流和安全裕度指标变化情况，自动执行在线的安全稳定评估，给出相应的调度辅助决策建议，并与事前预案进行比较，利于调度员进行综合评估和决策处理。

针对电网中常见的各类短路故障，建立了基于电网运行暂态数据、动态数据、稳态数据以及开关和保护动作信号的在新故障综合诊断和评估处理机制，在电网发生短路故障时，不仅能在线告警，提示故障类型和地点，而且可对电网中的短路电流、潮流分布变化等进行自动分析，并通过可视化技术展示给调度员。除此之外，还可以针对事故过程中的保护和开关动作情况进行评估，为优化保护和安自配置提供数据基础。

在2012年8月份强台风“海葵”登陆期间，通过与气象信息系统接口，实现了台风移动路径及风圈半径、强度的预报和跟踪，多次捕获电网中出现的短路扰动，并借助可视化界面提示调度及时处理，其故障识别可靠率达95%以上。

## 3 结束语

电网事故处理的要点在于风险防范、高效处理和全局掌握。实践证明本文所叙述方法的可行性，但在连锁性故障风险辨识的效率、准确性以及复杂解空间辅助决策的策略搜索等方面还需进一步研究。

### 参考文献

- [1] 宋卫东. 世界跨国互联网现状与发展趋势[J]. 电力技术经济, 2009, 21(5): 62-67.
- [2] UCTE. UCTE Transmission Deveopment Plan[R]. April 2009.
- [3] Central Electricity Regulatory Commission. Grid Security Need for Tightening of Frequency Band & Other Measures[R]. [http://www.cercind.gov.in/2011/Whats-New/AGENDA\\_NOTE\\_FOR\\_15TH\\_CAC\\_MEETINGHI.pdf](http://www.cercind.gov.in/2011/Whats-New/AGENDA_NOTE_FOR_15TH_CAC_MEETINGHI.pdf).
- [4] U.S.-Canada Power System Outage Task Force, Final Report on the August 14th Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations[R], April 2004. <https://reports.energy.gov/BlackoutFinal-Web.pdf>.
- [5] UCTE, Final Report: System Disturbance on 4 November 2006[R], 30 January, 2007
- [6] Swiss Federal Office of Energy (SFOE), Report on the blackout in Italy on 28 September 2003[R].

- November 2003.
- [7] 林伟芳, 孙华东, 汤涌, 等. 巴西“11.10”大停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 1-5.
- [8] Ian Dobson, Ian Dobson, Ben Carreras, David Newman. Towards estimating the risk of cascading failure blackouts[R]. April 2006. <http://www.ece.wisc.edu/~dobson/PAPERS/NWmott06.pdf>.
- [9] G. DONDOSSOLA, O. LAMQUET, A. TORKILSENG. Key issues and related methodologies in the security risk analysis and evaluation of electric power control systems[C]. CIGRE 2006. [http://www.labplan.ufsc.br/congressos/cigre06/DATA/D2\\_303.PDF](http://www.labplan.ufsc.br/congressos/cigre06/DATA/D2_303.PDF).
- [10] NERC. NERC Releases Report Assessing Risk to Reliability Performance of Bulk Power System[R]. September 20, 2011. [http://www.nerc.com/fileUploads/File/News/A\\_%20Metrics\\_20SEP11.pdf](http://www.nerc.com/fileUploads/File/News/A_%20Metrics_20SEP11.pdf).
- [11] 赵珊珊, 仲悟之, 张东霞, 印永华, 唐晓骏. 暂态电压稳定风险评估方法及应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 1-4.
- [12] 沈智健, 周家启, 卢继平, 赵渊, 熊小伏. 距离保护运行风险评估模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 6-11.
- [13] 吴文传, 宁辽逸, 张伯明, 何云良, 冯永青. 一种考虑二次设备模型的在线静态运行风险评估方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 1-5.
- [14] D. L. Pepyne, C. G. Panayiotou, C. G. Cassandras, and Y.-C. Ho, “Vulnerability assessment and allocation of protection resources in power systems[C],” in American Control Conference, June 2001.
- [15] D. L. Pepyne, “Topology and cascading line outages in power grids[J],” Journal of Systems Science and Systems Engineering, vol. 16, no. 2, 2007.
- [16] 于会泉, 刘文颖, 温志伟, 平德明. 基于线路集群的连锁故障概率分析模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 29-33.
- [17] 熊小伏, 蔡伟贤, 周家启, 赵志杰, 秦继承, 吴娟, 李雪松. 继电保护隐藏故障造成输电线路连锁跳闸的概率模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(13): 6-10.
- [18] IEEE PES CAMS Task Force on Understanding, Prediction, Mitigation and Restoration of Cascading Failures, “Initial review of methods for cascading failure analysis in electric power transmission systems[C],” in IEEE Power Engineering Society General Meeting, July 2008.
- [19] H. Song and M. Kezunovic, “A new analysis method for early detection and prevention of cascading events[J],” Electric Power Systems Research, vol. 77, pp. 1132–1142, June 2007.
- [20] 张伯明, 吴素农, 蔡斌, 等. 电网控制中心安全预警和决策支持系统设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6):1-5.
- [21] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架: (一) 从孤立防御到综合防御[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1):8-16.
- [22] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架: (二) 广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2):1-10.
- [23] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架: (三) 各道防线内部的优化和不同防线之间的协调[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3):1-11.

(收稿日期: 2015-05-15) EA

#### 作者简介

陆进军 (1972-), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向: 电力系统分析、电网故障诊断等。

闪鑫 (1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统故障诊断和综合智能报警系统设计、研发工作。