

综合防御由偶然故障演化为电力灾难

——北美“8·14”大停电的警示

薛禹胜

(国电自动化研究院/南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003)

摘要: 电业界在技术层面上思考过 1996 年的北美西部大停电, 又在经济层面上反思过 2000 年的加州电力危机, 却没有充分认识到在电力市场环境电力市场发生更大停电灾难的可能性, 也未能在 2003 年北美东部“8·14”大停电的演化过程中予以制止。其中, 在思维方式上的教训为: 应该在统一的框架下, 有机地结合电力体制、市场运营、监管规则、规划设计、仿真分析、信息工程、调度运行、控制技术、科技投入和人才培养等因素进行反思。用仿真重现相继停电的全过程固然必要, 但更重要的问题是: ①人们分别有 22 min, 9 min, 5 min, 29 min 的时间来阻止第 2, 3, 4, 5 个相继开断, 为什么却无作为地听任其发展为系统振荡? ②为什么大范围的停电竟然长达 29 h? 这些案例是我国电力工业界的极好教材。“8·14”大停电, 既暴露了电力市场对电力系统稳定性的负面影响, 又反映了互联网相继开断的严重后果。技术方面的教训包括必须完善并协调各级信息系统, 提高在线安全稳定的量化分析及控制决策能力, 研究针对各种灾变的防御控制计划, 协调预防控制和紧急控制, 采用自适应的系统保护装置以及电力系统和电力市场的动态仿真器等。

关键词: 北美大停电; 电力系统; 电力市场; 物理-经济动态; 量化分析; 协调控制

中图分类号: TM73; TM712

0 引言

跨大区电网互联和电力市场的发展在带来明显经济效益的同时, 也对电力系统的物理及经济安全稳定提出严峻的挑战^[1]。不论在电力系统的物理稳定性方面, 还是在电力市场的经济稳定性方面都不乏惨痛教训。美国电力系统分为东部、西部、德州 3 个联合系统。1996 年西部系统的大停电直接由相继开断导致。当时电力市场刚启动, 对可用发电容量和可用输电容量的长期影响还没有反映出来。因此, 大停电后的讨论自然集中在技术方面, 而没有认真涉及电力市场的影响^[2]。4 年后的 2000 年, 加州电力系统的可用容量不足等问题已经非常突出, 意外的负荷增长导致了电力市场的失败^[3]。由于输电公司的危机并不是直接由电网故障引起, 因此人们的讨论集中在市场经济方面, 而没有考虑物理稳定性^[4]。美国乃至全球有关机构和学术界对这些灾难的反思极其认真, 美国政府将其作为危及国家安全的头等大事来抓。

但在 2003 年 8 月 14 日, 北美东部系统却又发生了一连串的相继开断, 最终导致了系统失稳, 酿成

有史以来最大规模的停电灾难(“8·14”大停电)。100 多个发电厂, 包括 22 个核电厂, 几十条高压输电线路雪崩似地停运。系统失去了 61.8 GW 负荷, 扰乱了 5 000 万人的生活, 停电长达 29 h, 经济损失高达 300 亿美元。2003 年 8 月 28 日, 伦敦电网也由于相继故障而持续停电 34 min, 60% 的地铁停运, 50 万人被困, 所幸停电区域没有进一步扩大。

强调并深化已经在 1996 年和 2000 年 2 次电力灾难中得到的教训是必要的, 但如果还有更深层次的原因没有被认识到, 那么类似的灾难极有可能还会发生, “8·14”大停电就是一个教训。2002 年, 文献[5]指出电力市场稳定性与电力系统稳定性的关系, 强调应该在统一的框架中反映经济问题和技术问题的交互作用, 并根据交易-投资等环节的闭环控制思想建立电力市场动力学的框架模型。

在大规模的市场化和系统互联下, 系统的运行条件、稳定裕度、备用容量以及对突发事件的应变能力都与以前大相径庭。电网中能量流、资金流和信息流的时间尺度差别巨大, 却又紧密地互相影响。电力生产和消费必须每时每刻平衡, 但其流通环节在物理上和运行上都具有自然垄断性, 而且其生产规模的扩大又需要很长的时滞。一方面, 为了缓解电网的阻塞及正确地引导对发电和输电的投资, 在输电费中必须考虑物理系统失稳的风险; 为了在紧

收稿日期: 2003-09-03。

国家重点基础研究专项经费资助项目(G1998020301); 国家自然科学基金资助项目(59920037)。

急状态下的应变,系统在任何情况下必须保留足够的备用容量。这些技术因素强烈地影响了电力市场的经济稳定性。另一方面,电力交易市场通过发电竞争影响到电力系统当前的物理稳定性;电力投资市场通过改变今后的可用发电容量和可用输电容量来影响电力系统以后的物理稳定性。如果市场运营不能引导出充足的远期可用发电容量和可用输电容量,不但电力市场有稳定性危机,而且电力系统中的偶然故障也更容易发展成相继开断,并导致大范围停电。俄罗斯电网比美国更陈旧,技术水平也落后,却没有发生过如此大面积的停电,因此不能简单地将“8·14”大停电归罪于设备的陈旧。问题是由多方面因素综合形成的,但以往却总是将电力系统稳定性与市场化割裂开来讨论。

我国高速发展的经济对电力工业的依赖日益增加,电力系统的发展规模仅次于美国,但电网较之薄弱得多。我国电力市场化正在摸索之中,揭示电力市场对电网稳定带来的负面影响并对其进行适当的监控,不但对电力系统的稳定性来说极其重要,也是建立健康有序的电力市场的重要保证。在这样的环境下,支付了惨重代价的“8·14”案例是极其宝贵的教材。我国电网在垄断体制下积累了成功的运行经验,但在新形势下不能完全照搬和盲目乐观。电网在物理上和技术上都具有自然垄断性,必然会引入市场力。既然电力市场不可能成为完全的市场经济,就必须对其进行适度的管制,例如电网的分层分区管理和统一调度,厂网的控制系统之间、应急预案之间的协调,合理的信息共享等。管制强度的优化控制应该是电力改革中的重要研究课题。

单个故障的概率可以设法降低,但不可能杜绝;系统范围的大停电则应该完全避免。为此,应该针对电力体制、市场运营、市场监管、规划设计、仿真分析、信息工程、调度运行、控制技术、科技投入和人才培养等方面进行综合研究,并分析它们的相互影响,找出大停电深层次的原因。在掌握详细信息之前,对整个灾变过程做出可信的分析是不可能的。1996年,北美电力可靠性委员会花了2个月的时间才完成了对30 GW,5 h停电事故的调查。“8·14”大停电不但规模大得多,还涉及美国的8个州和加拿大的安大略省,涉及各国内部不同部门的管辖权,事故调查的难度可想而知。因此,本文的分析将不涉及其细节,而是从宏观角度来思考灾变的机理。

1 市场环境下的信息充分性和安全性

为保证复杂运行条件下的电网安全稳定,要求调度中心能获得足够完整的信息来支持稳定控制的

决策,要求将采集的信息从静态扩展到动态,从简单的动态显示扩展到分析-决策-保护-控制功能,支持在线预决策功能,支持电力市场动态仿真器功能。为此,必须关注相量测量单元等的布点和深层次应用、信息量不足时的分析技术、信息安全技术和信息系统在受到攻击时的稳定性等问题。

电力市场环境下,物理系统的信息也是商品,必然涉及到信息的有偿使用和价值化。经济信息的披露是重要的监管手段。及时披露参与者的私有信息有利于社会,但不利于参与者的商业机密。信息的充分性和安全性直接影响到电力系统的稳定性和电力市场的稳定性,甚至成为电力工业的脆弱环节。

出于经济动机,电力系统中经济独立的各成员会尽量减少向其他成员索取与整个系统的安全有关、但对自己竞争力没有直接帮助的信息。这样,在紧急情况下就难以有效制止故障范围的扩大。在事故发生后的处理和恢复过程中,各成员由于缺少外部信息,必然会拖长恢复过程。“8·14”大停电的最终调查报告发表后,人们对这个问题也许能得到更深刻的理解。

2 安全稳定性的分析方法

1996年美国西部协调委员会(WSCC)的事故报告指出事态扩大的部分原因为:事先未研究过的实际运行条件使调度员不知所措;缺乏稳定裕度的概念,因此不知道系统离开安全稳定极限有多远;没有稳定控制的分析和决策支持。

在“8·14”大停电首个开断事件发生后的1 h内,有5条345 kV线路相继开断,它们之间分别有22 min, 9 min, 5 min, 29 min的时间间隔。在第5条线路跳闸后的第3 min,加拿大电网与美国东部电网之间发生了振荡。2 min后发生“雪崩”,造成大范围停电。目前还不知道有关的决策部门在这宝贵的1 h内的作为,但是可以肯定:由于没有在线跟踪的稳定性分析工具、预防控制自动决策支持和自适应的紧急控制装置,使这次事故始终处于在技术上非常无助的困境。

由于组合爆炸的原因,离线分析不可能考虑比 $N-2$ 更复杂的扰动场景。虽然“8·14”大停电发展过程的前1 h内就发生了5个相继开断($N-5$),但如果在下一个相继开断发生之前,能够按当时的实际情况完成 $N-1$ 的安全稳定分析,算出实际的传输极限并修正控制预案,就有可能避免新的相继开断,从而避免大范围停电。

如果装备了先进的在线分析工具,那么不论系统中相继发生了多少条支路的开断和多少个注入量

的切除,运行人员仍然能够清楚地把握住系统的实际稳定程度和必要的稳定控制措施。为此,稳定分析算法除了要满足精确性、强壮性、快速性、适用性和实用性外,还应实现:①稳定性的量化评估及决策,给出参数极限值和稳定域,分别为同步稳定性、电压安全稳定性和频率安全稳定性提供严格的安全稳定裕度;②在线跟踪系统变化,在3 min~5 min内对全部感兴趣的故障场景完成定量分析;③反映深层次机理,包括潜在的故障模式,识别最有效的控制方式和最佳控制量;④不含假设或经验因素;⑤可基于概率和风险的方法进行评估;⑥对模型和场景应该有高度适应能力,能够快速分析交直流并列运行存在的稳定问题及处理措施;⑦电磁暂态、机电暂态、中长期过程的综合分析,同时计及同步稳定性、电压安全稳定性、频率安全稳定性;⑧与电力市场的运营优化和监管优化分析相结合;⑨能量流、资金流和信息流在长时间尺度的协调;⑩人机界面的智能化和计算结果的可视化。

从“8·14”大停电过程中记录到的录波图中可以看出:电压在0.5 s内跌到大约0.6(标么值),大量感应电动机减速并在故障清除后吸收大量电流而堵转。电压在0.6附近停留了大约1 min后,开始非常缓慢地上升,8 min后恢复到0.9。期间,不少发电机由于低频而跳闸,致使大量负荷被切除,最终导致大范围停电。由此可见,先进的在线分析工具应该能定量地分析暂态电压跌落问题。

美国在过去的30多年中为开发能满足上述要求的软件,投入了大量的人力和物力,但一直没有成功。笔者认为,重要原因之一是美国的一些“学术权威”在学术上的傲慢与偏见,并且长期采用了虚假的仿真结果来误导美国及全球在该领域的研究。事实上,满足上述要求的技术早在1993年就被我国科技人员原创性地掌握,并先后成功地用于实际电网的在线分析和自适应紧急控制装置^[5-8]。到2002年末为止,该技术已经向包括美国、加拿大在内的21个境外电力机构输出,并广泛应用于实际电力工程的离线分析。目前美国、加拿大的一些电力公司已准备在线应用该项技术。

此外,为了优化管制措施及其力度,还需要电力市场动态仿真器。这将是今后研究的重点之一。

3 自适应的安全稳定控制

目前还没有关于安全稳定控制装置在“8·14”大停电灾难中的行为分析报告,因此以下的分析有待于今后的校验。但可以肯定的是,各电力公司在调度和事故处理中缺少协调,电网缺乏统一调度管

理,安全稳定控制措施不力,从而导致灾难后的电网恢复过程非常长。这暴露了北美东部联合电网缺乏有效的电网事故预案和黑启动方案,对于核电机组退出后重新发电的缓慢过程没有思想准备,也没有举行大规模停电演习的制度。

应该发展先进、可靠的继电保护装置和稳定控制技术,加强继电保护、失步振荡解列装置和安全稳定装置的优化配置,切实加强安全稳定运行第三道防线的措施。传统的频率电压紧急控制装置是基于静态功率平衡来整定的,这显然不能满足现代电网安全稳定运行控制的要求。必须考虑电压跌落时的负荷控制。

目前世界上的稳定控制装置均采用传统的“离线预算,实时匹配”方案。在离线准备决策表时,用预先指定的运行工况和扰动场景作为决策表的索引。运行中一旦检测到事故,就按实际工况和事故在决策表的索引中进行近似的匹配,取出对应的控制策略。离线预算时,与预防控制一样必须考虑所有可能出现的工况,因此,需要数百万次的仿真和专家的紧密参与。但再多的计算也难免在匹配工况时引入大误差甚至失配,并且一旦电网有大的变化就必须重新计算决策表,因此这种紧急控制装置的适应性很差。

如果对一个确定工况的详尽研究可以在合理的时间内完成,就可以根据在线采集到的实际工况不断刷新控制措施表,避免对成千上万不相关工况的大量离线计算。要将紧急控制方案改进为“在线预算,实时匹配”的框架^[9],可以从3种途径着手。其一是改进算法;其二是采用并行处理技术;其三是开发新的紧急控制框架。这3方面是相互依赖的,而快速的定量算法是自适应紧急控制的核心技术。这样的自适应紧急控制装置已于2002年在若干个中国电网中正式投入运行。

紧急控制和预防控制的协调是最近提出的新技术^[10],但离开工程应用还有一段距离。

4 多层次的协调与优化

局部电网在优化配置资源和相互支援的动机下趋于互联。但与此同时,事故的影响也更容易扩大。互联大电网的稳定问题并不是小系统稳定问题的简单叠加,弱联络线的互联电网很容易在故障中失去稳定。在我国,初期互联电网的联络线不可能很强,高效的远方大机组越来越重要,联络线的作用从紧急支援延伸到经济换电而接近稳定极限。为此,必须对可能出现的新问题进行充分的研究。

从物理层面看,互联不但扩大了扰动波及的范

围,增加了相继开断和大面积停电的风险,并使系统的动态行为更加复杂,潮流控制和稳定控制的难度剧增。

从体制和管理层面看,利益集团、地方政府、联邦政府之间的利益矛盾和体制上的混乱助长了当前美国电业的危机。电力市场的发展不但使设备的运行条件越来越难以预测并接近热极限,也增强了用户的自我保护意识。环保推进了可再生能源的利用,也制约了新的电力项目。开发水电往往伴随着远方输电及稳定性问题,而大量分散电厂接入电网也显著影响系统的安全稳定。如不能正确处理这些问题,则可用发电容量不足和电网的动态阻塞的情况将进一步恶化,更大范围、更长时间停电的风险也将增加。

从经济层面看,电力市场的稳定性是保证经济可靠的电力供应的必要条件。政府部门和各市场参与方都希望了解电力市场在受到扰动或控制时的动态行为和稳定程度,评估影响电力市场稳定性的各种因素,因此,可靠的仿真工具和评估方法对于动态分析、决策支持及电力市场的运作十分重要。

美国电网由多个独立电网相互连接而成,按协议进行调度,平衡负荷,管理安全,处理事故。由于没有统一的调度机构,各成员电网的二次系统都各自为政,在紧急情况下以保存自己为主,往往扩大了事故。众多保护和控制系统均采用分散和局部设计,很少从空间和时间的全局考虑,一旦发生扰动,各自动作,容易导致大面积的稳定问题。

互联电网需要按分层分区的原则统一调度管理,避免电磁环网运行,减少事故对其他电网的影响。协调还反映在国家、区域和省三级电网的建设中,安全稳定控制系统的规划、研究、运行问题,对功角、电压、频率控制的协调,对多种控制装置的协调,对运行方式部门与继电保护部门的协调等。

5 以体制、经济和技术相结合的观点总结教训

电业的经济稳定性与物理稳定性之间的相互关联特别紧密。电力市场以电力系统为物理基础,电力系统又以电力市场为运营模式,电力市场的经济稳定性既受到电力系统物理稳定性的制约,又影响着后者。两种稳定性彼此密切相关,构成闭环。任一方面的稳定问题都会影响另一方面的稳定性,都会带来严重后果甚至危及国家安全。因此,既不能采用一般经济问题的稳定性分析方法,也不能仅从物理层面来考虑,而必须将电力系统和电力市场结合起来研究。两者的稳定性都有赖于足够的可用发

电容量与可用输电容量。不论是运行备用不足,还是电厂解列与系统切负荷不协调,都会对频率和电压的波动推波助澜,甚至形成“雪崩”。

理论上,完全的市场化有利于以合理的价格生产数量正好合适的商品。但是,电力不能像一般商品那样大量储存,需要非常充足的发电容量和输电容量。由于参与电力工业的资金门槛和技术门槛都很高,发电侧的市场力往往比其他商品的供应商显著,而输电环节更是具有自然的垄断性。若可用输电容量制约了交易量,不但边际电价会增加,并且相当于降低了实际的可用发电容量。同时,电力系统稳定性的制约信息将进一步恶化电力市场的长期稳定性。

电力工业市场化后,参与者关心的主要是眼前的利益,投资可能长期保持在较低水平。在过去10年内,美国对电力的需求增长了35%,而输电能力仅提高了18%,对三大电网的投资,每年以200亿美元的速度递减,堵塞日趋严重。美国的高峰备用已由1990年的20%降到2000年的10%;英国的系统备用也从20年前的20%降到现在的10%以下。但是电力工业投资需要长达数年的滞后才能见效。这个矛盾若解决不好,电力工业就不可能健康发展,甚至产生灾难性后果。在美国,法律上负责电力管理的能源部却难以协调全美电力;作为行业组织的北美电力可靠性委员会有权制定技术标准,但无权惩罚违规操作。监管的混乱还反映在缺乏统一的调度,电力系统的运行和电力市场的运营被机械地孤立开。围绕电力改革,国会、联邦政府、州政府,以及众多的大小电力公司之间的复杂争斗是理顺关系中最棘手的问题。总之,适度而有序的监管和激励机制非常重要,盲目取消所有的管制规定并不妥当。

过高的容量电价会提高边际电价,减慢技术更新的速度。但如果过低,又会驱使效益较低的发电机组过快退役,这样,当发生预料外的高负荷时,电力市场将出现不安全,并进而影响电力系统的稳定性。电网建设与电源建设由不同的经济利益体投资,如果它们的布点或进度不协调,则阻塞代价可能破坏电力市场稳定性。负荷的增长可能很快,但电源和电网的建设周期却很长,其困难相当于要用时间滞后长达数年的反馈控制去稳定一个快速系统。因此,电力市场环境下的备用容量一般都会有周期性振荡分量,如果监管措施不当,备用容量振荡的周期和幅度均会增加,甚至趋于发散。为了保证电力工业的长期发展中有足够的备用发电容量和备用输电容量,电力系统的长期规划必须考虑电力市场的运营与对投资的引导信号。健康、稳定的电力市场不会造成当前美国电力系统高峰备用的困难。

与许多大停电相似,整个“8·14”大停电过程分为3个阶段:①较长时间的“逐步恶化阶段”(62 min的相继开断);②较短时间的“临界阶段”(2 min的振荡);③快速的“灾变阶段”(10 s的雪崩)。如果有统一的紧急调度机制,如果实施了在线稳定分析和决策支持功能来应对“逐步恶化阶段”,配置了自适应的紧急控制装置来应对“临界阶段”,那么从技术上看,完全可以避免如此大范围、长时间的灾难。

6 结语

北美电力可靠性委员会正在寻找大停电的技术原因,但就事论事并不能有效避免再次发生大停电。本文强调,应该从体制、运营、监管、规划、信息、运行、控制、科技和人才等方面思考北美大停电的教训,并综合进行分析及防御。这些因素包括:监管和市场规则没能激励出足够的可用发电容量及可用输电容量;没有周密的一次能源规划、发电规划和输电规划;没有统一的调度,缺乏信息的合理共享;对于互联电网动态行为,包括暂态电压跌落,认识不足;没有实施在线稳定量化分析和决策支持;没有全局协调的自适应紧急控制装置;没有不断在线修正的控制方案。因此,在本来完全可以有作为的时间段内,却只能听任一连串的相继开断发生,并拖延了如此长的时间才恢复供电。

为了结合我国的具体情况确定对策,建议重视如下的研究课题:

a. 基于电力市场和电力系统的联合模型,研究监管对电力工业的经济性和可靠性的影响,强调统一系统规划和统一运行调度的重要性,保证充足的运行备用、远期可用发电容量及可用输电容量。对电力市场的监管度进行优化,在保证远期电力市场和电力系统稳定性的约束下,尽量提高当前市场的效率。例如,由统一的系统规划来保证一次能源消耗的合理结构和发电-输电的协调,而由投资者对规划确定的项目进行竞标来保证经济性。

b. 深入研究大型互联电网的复杂行为,包括低频振荡和暂态过程中的电压长期跌落,特别在我国出现的落点相近的多条直流/交流混合互联情况。需要深入研究相继(过负荷)跳闸的演化规律:电磁环网,不合适的交直流并列,换流器换相失败,保护装置的误动或拒动(特别在系统振荡时),失步解列、低频减载、低压减载、高频切机等紧急控制装置配置不完善;要有明确的解列点来隔离故障区,系统保护装置的决策表匹配误差太大或失配;系统解列后的功率不平衡导致大量机组退出运行,进一步发展成全停电;扰动引发系统低频振荡,最终引起全停电。还要研究低压和低频减载装置的整定方法和紧急控

制装置间的协调与配合。

c. 继续深入研究大区互联电网安全稳定性和灾变预报的理论及方法,研究发电厂控制与电网控制之间的交互影响,提高在线安全稳定的量化分析、自适应紧急控制、自适应恢复控制及黑启动、协调控制的能力,开展调度培训仿真器和电力市场动态仿真器的研究及应用,定期举行大规模的灾变防御演习,在大面积停电后尽快恢复供电。

d. 研究信息价值的评估,在物理信息不完全条件下的分析-控制技术,以及在经济信息不完全条件下的分析-监管技术。重视负荷等物理模型及参数的识别,以及电力市场经济参数的识别。

参考文献

- 薛禹胜(Xue Yusheng),现代电网稳定理论和分析技术的研究方向(Proposed Researches on Stability Theory and Analysis Technique for Modern Power Systems),电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2000,24(7):1~6
- EPRI Final Report, System Disturbance Stability Studies for WSCC, EPRI TR-108256, 1997
- 文福拴(Wen Fushuan),David A K. 加州电力市场失败的教训(Lessons from Electricity Market Failure in California),电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2001,25(5):1~5
- Makansi J. California's Electricity Crisis Rooted in Many Failings, IEEE Spectrum, 2001,38(3)
- 薛禹胜(Xue Yusheng),电力市场稳定性与电力系统稳定性的相互影响(Intertions Between Power Market Stability and Power System Stability),电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2002,26(21):1~6;26(22):1~4
- 薛禹胜(Xue Yusheng),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(Quantitative Study of General Motion Stability and an Example on Power System Stability),南京:江苏科学技术出版社(Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press),1999
- 薛禹胜(Xue Yusheng),电力系统暂态稳定在线监视和预防控制的方法(On-line Analyses and Preventive Control for Transient Stability of Power Systems),中国专利(Chinese Patent),ZL 95 1 10947.2,2003-09-03
- 薛禹胜(Xue Yusheng),电力系统的自适应系统保护方法(Adaptive System Protection Scheme for Power Systems),中国专利(Chinese Patent),ZL 95 1 10946.4,2003-09-03
- Xue Y. An Emergency Control Framework for Transient Security of Large Power Systems, In: International Symposium on Power Systems, Singapore, 1993
- 薛禹胜(Xue Yusheng),暂态稳定预防控制和紧急控制的协调(Coordinations of Preventive Control and Emergency Control for Transient Stability),电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2002,26(4):1~4,9

薛禹胜(1941—),男,中国工程院院士,总工程师,博士生导师,主要从事电力系统自动化方面的研究工作。E-mail: yxue@nari-china.com

(下转第37页 continued on page 37)

THE WAY FROM A SIMPLE CONTINGENCY TO SYSTEM-WIDE DISASTER ——Lessons from the Eastern Interconnection Blackout in 2003

Xue Yusheng (Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: WSCC blackout in 1996 has been analyzed basically from a pure technical viewpoint and California electricity crisis in 2000 has been discussed from a pure economic viewpoint. However, the possibility of a much more severe blackout had not been cognized before the occurrence of Eastern Interconnection blackout in 2003. As a result, this catastrophe didn't be held out though there is a quite enough time period to arrest the global blackout between two cascading line tripping. Investigations on this catastrophe should be performed in a uniform framework that integrates all important factors, such as the organization of electrical power industry, market operation and surveillance, power system planning, analysis tools, dispatch strategy, information engineering, control schemes, R&D and personnel training, etc. Some important questions are: ① why the cascading tripping can't be stopped since there are respectively 22, 9, 5, 29 minutes to hold out the 2nd, 3rd, 4th, 5th cascading tripping? ② why the wide area blackout lasted for as long as 29 hours? The negative effects of electricity market on power system security are analyzed. Lessons on technical aspects include properly sharing information, on-line quantitatively analyzing power system security, on-line refreshing control decision, coordinative defense schemes; coordinating preventive control with emergency control, adaptive system protection schemes, dynamic simulator of both power system and electricity market, etc.

This work is supported by National Key Basic Research Special Fund of China (No. G1998020301) and National Natural Science Foundation of China (No. 59920037).

Key words: Eastern Interconnection blackout; power systems; electricity market; physic-economic dynamics; quantitative analysis; coordination control