

2003 年国际若干停电事故思考

甘德强¹, 胡江溢², 韩祯祥¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 华东电力调度通信中心, 上海市 200002)

摘要: 2003 年夏秋, 国际范围内连续发生了若干大停电事故, 引起了国际社会的广泛关注。最近, 各国有关方面已公布了最新的事故调查和分析报告。文中主要介绍意大利大停电、瑞典—丹麦大停电以及美加大停电事故的分析调查结论, 并探讨应对措施。

关键词: 停电; 电力系统; 安全稳定; 潮流越限; 连锁故障

中图分类号: TM73; TM712

0 引言

今年夏秋国际范围内发生的若干大停电事故(意大利大停电、瑞典—丹麦大停电、英国伦敦大停电以及美加大停电)对世界电力工业影响巨大。今年夏季中国华东地区严重缺电, 上海浦东地区也发生小规模停电事故。这些事件为我国电力工作者提供了极好的反思机会。

本文根据最新公布的研究报告^[1~4], 介绍意大利大停电、瑞典—丹麦大停电以及美加大停电的事故序列和起因, 以期抛砖引玉, 与同行共同探索防止类似大停电事故发生的方法。鉴于英国大停电事故已经在文献^[5]中介绍, 这里就不再讨论。

1 “9·28”意大利大停电^[1]

2003 年 9 月 28 日当地时间凌晨 3:30 左右, 意大利全国大停电。至当日 23:00, 停电区域全部恢复供电。下面根据事故调查的中期报告^[1], 简单介绍此次停电事故。

a. 事故前,意大利为一长形半岛, 其电网是一个大的受端系统, 总负荷为 27 702 MW。意大利从欧洲电网受电总额 6 651 MW, 其中从瑞士受电最多, 为 3 610 MW, 从法国受电 2 212 MW, 从斯洛文尼亚受电 638 MW, 从奥地利受电 191 MW。由 6 条 220 kV 和 9 条 380 kV 线路组成的意大利—欧洲输电断面负荷水平接近安全极限。近年来, 由于电力市场的运行, 瑞士电网潮流模式比设计电网时预想的潮流模式有较大变化, 因此瑞士电网和调度中心经过小规模改造, 电网安全裕度有所增加, 但仍然很接近安全极限。

b. 当日 3:01,瑞士一条 380 kV 线路 Mettlen-Lavorgo 可能因为重载(线路潮流为热极限的 86%, 这个热极限是假定气温在 10 °C 时确定的)下垂, 发

生接地故障。由于线路重载, 线路两端母线电压相角差达到 42°(如果超过 30°, 保护装置将阻止线路重合), 线路多次自动重合失败。在 3:08, 手动重合线路 Mettlen-Lavorgo 失败。线路 Sils-Soazza 潮流超过了长期热极限的 10%, 但在短期极限之内, 线路可以在短期极限运行 15 min。

c. 3:11,为缓解线路过载, 瑞士调度请求意大利调度减少负荷 300 MW。3:21, 意大利实现减负荷。

d. 3:25,潮流超过长期热极限的线路 Sils-Soazza 可能因为下垂导致接地故障, 线路跳闸。此后 12 s 内, 大批相邻线路因为过载跳闸, 同时, 意大利机组和欧洲机组之间发生同步失稳(故障录波装置观察结果), 大批意大利机组的辅机不能正常运行, 主力机组跳机, 故障解列装置动作, 意大利被隔离在欧洲电网外。2 min 30 s 后, 由于大批意大利机组跳机, 孤立的意大利系统不能维持频率和电压稳定, 意大利全国停电。

图 1 显示事故发展过程期间的网络状态和事故原因^[1]。

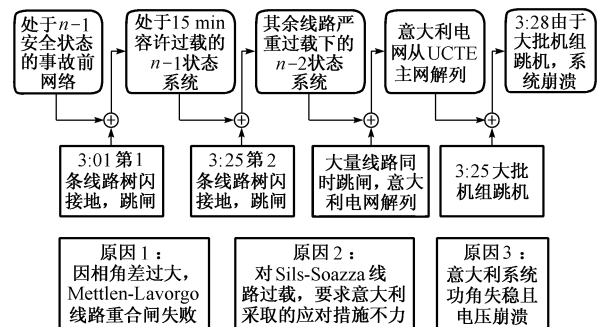


图 1 意大利大停电事故发展过程期间的网络状态和事故原因

Fig. 1 Network state overview and root causes

文献^[1]指出事故发生的 4 个原因(图 1 只显示了其中 3 个原因)为:

a. 线路过载,重合闸不成功。

b. 瑞士调度的 EMS 给出了校正控制的方法,但可能没有考虑线路热极限取决于许多因素,如当时的气温、风力,有相当不确定性。或者瑞士调度对事故的严重性认识不足,反映不及时,应对措施不力,线路只能过载 15 min,但调度却使用了 20 min 进行校正控制。

c. 系统失去暂态稳定,由此带来频率稳定破坏,系统崩溃。1993 年 5 月的一次事故中,意大利同欧洲主网也基本脱离联系,交换功率由正常的 5 400 MW 降至 1 300 MW,但意大利电网仍然能够稳定运行,其原因在于当时意大利系统没有失去暂态稳定。

d. 输电走廊对地间距可能不合理。这个原因需要进一步证实。

文献[1]还发现,这次事故中,广域测量系统(wide area measurement system)提供了大量的对事故分析的有用信息。应当研究进一步建设广域测量系统的必要性。上述分析带来的启示如下:

a. 在电网运行时,尽量避免使用线路短期容量极限,而尽可能采用长期容量极限。在这次事故发展过程中,瑞士系统出现静态安全问题,但意大利并没有看到。因此,应当加强控制中心数据交换,扩大安全分析与监视的范围至相邻区域,建立覆盖面更广的计算机监控系统。

b. 虽然静态潮流越限是大停电的起因,但其影响是有限的,最后“击垮”意大利电网的却是系统失步。如果意大利电网能够维持与欧洲电网同步运行,则停电范围应小得多。应当进行在线动态安全分析,实时监控系统电压和同步稳定。在失去第 1 条线路后,运用在线动态安全分析软件进行 $N-1$ 暂态稳定计算,应当能够发现系统已经接近或者超越稳定极限。意大利电力系统长期以来确实进行了在线动态安全分析^[6],但其为什么没有发现当时系统处于紧急状态,估计原因在于系统模型不够准确,比如没有能够实时模拟欧洲电网。

c. 当然,对于意大利这样的长形电力系统,适当的切机切载系统能够提高稳定极限。文献[7]给出了更丰富的有关暂态稳定分析和控制的阐述。

2 “9·23”瑞典—丹麦大停电^[2]

2003 年 9 月 23 日 12:30 左右,瑞典南部和丹麦东部(负荷中心)地区发生大停电事故(如图 2 所示)。500 万人受到影响,损失负荷 1 800 MW。当天傍晚 19:00 左右大部分负荷恢复供电。

根据事故调查中期报告,事故序列^[2]如下。

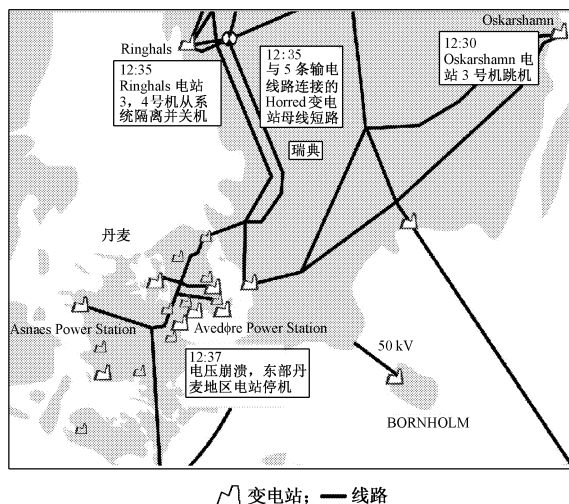


图 2 瑞典—丹麦大停电事故发展过程
Fig. 2 Development of Sweden/Denmark blackout

a. 事故前,丹麦东部电力系统有若干机组和 400 kV 线路停运,但其时系统总出力为 1 850 MW,总负荷为 1 800 MW,其中 400 MW 输出到南部瑞典地区,总可用容量为 3 300 MW,系统可用容量充裕,系统运行稳定,并且能够满足 775 MW 的备用要求。同样,南部瑞典电力系统事故前也处于稳定运行状态,系统负荷处于低水平的 3 000 MW,距离系统安全运行极限有较大裕度。

b. 当日 12:30,瑞典南部地区 Oskarshamn 电站 3 号机组(当时出力大约 1 200 MW)供水回路的一个阀发生故障,导致机组出力降低,并很快停产。随后,系统频率下降,但地区机组一次调频系统快速响应,迅速将频率稳定在 49.9 Hz,其间没有出现异常电压。

c. 12:35,瑞典南部地区 Horred 变电站由于隔离开关机械故障导致双母线故障,结果 4 条 400 kV 线路跳闸,导致 Ringhals 电站 3 号和 4 号机组跳机,系统损失约 1 800 MW。另外还有一条 400 kV 线路也因此与系统失去联系。

d. 12:35 至 12:37,上述事故使瑞典南部地区严重缺电,随后瑞典北部和丹麦东部地区机组快速提高出力,向瑞典南部缺电地区送电,其结果是线路过载并伴随缺电地区电压崩溃,最终丹麦东部和瑞典南部地区与瑞典北部地区完全隔离,电压降至 0。

观察事故期间电压和频率动态(见图 3),发现事故发展经历了如下 5 个阶段:

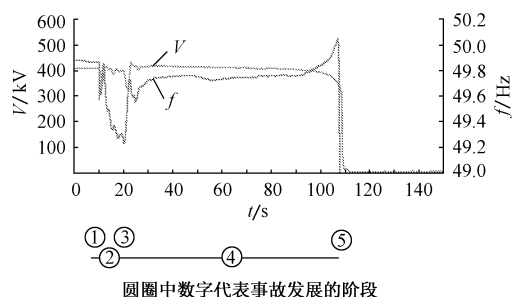
第 1 和第 2 阶段:在 12:35,4 条线路跳闸后,系统电压下降,丹麦东部和瑞典南部机组发生振荡,并引起频率波动,但随后稳定下来。

第 3 阶段:持续 10 s 左右,期间电压持续下降,导致部分 130 kV 和 220 kV 线路跳闸,随后部分负

荷由于低电压自动减载。

第 4 阶段:持续 80 s 左右,由于部分负荷减载,电压开始稳定在 400 kV 并缓慢下降,频率也基本稳定。但好景不长,因为受端距离电源侧电气距离太远,电压的缓慢下降并没有停止。由于电压的缓慢下降伴随联络线潮流剧增,距离保护判断出“短路故障”,切断了瑞典南部和北部的所有联系。

第 5 阶段:东部丹麦地区部分电站过载最后切机,零电压继电器将丹麦和瑞典电网解列。丹麦 Asnæs 电站 5 号机的主变因为过载被破坏, Avedøre 电站 2 号机也受到损坏,这些损失延迟了故障恢复时间。



圆圈中数字代表事故发展的阶段

图 3 瑞典—丹麦大停电期间电压和频率动态过程

Fig. 3 Voltage and frequency records during Sweden/Denmark blackout

文献[2]提出了如下问题:

- 恰当的故障恢复计划可以减少停电损失。
- 停电期间应当加强信息的发布。
- 因系统解列形成“孤岛”的区域似乎应当少配置启停较慢的机组,否则一旦系统解列,孤岛形成,故障恢复需要更长时间。瑞典南部 Bornholm 岛此次的经历就是这样。

从文献[2]的事故分析推测,瑞典南部停电属于比较典型的缺少电源和网架支撑导致电压崩溃。而在丹麦东部地区,由于在线机组向瑞典南部提供紧急支援,导致主力机组严重过载包括主变过载而跳机。由此可以得到如下一些观察结论,供进一步思考:

- Oskarshamn 电站 3 号机组事故和 Horred 电站双母线短时间内相继故障是事故直接原因。这是典型偶发性 $N-2$ 故障。大停电事故在 2 min 内完成,似乎是一个“技术”事故,没有发现人为的错误,在事故发生后的 2 min 内调度员似乎也难以有所作为。
- 瑞典南部“大机小网”问题突出,主力机组跳机后系统因为缺少电源导致电压崩溃,缺少电源是起因,电源崩溃是后果。因此,如果电网和电源设计合理,类似大停电是可以防止的。
- 大停电由于隔离开关机械故障引起,而这样

的故障是无法避免的。只有加强系统可靠性研究,识别系统薄弱环节,发现恶性事故隐患,才可能制定相应措施,防止类似事故发生。文献[8]进一步介绍了这个方法的重要性。

d. 虽然设备故障无法避免,但恰当、快速的紧急控制例如低压低频减载可以减少停电损失。可以想像,如果瑞典南部地区有性能良好的低压低频减载系统,或许丹麦东部大停电事故就可以避免。

3 “8·14”美加大停电^[4]

2003 年 8 月 14 日美国、加拿大大停电是历史上最大的停电事故,事故期间上百台机组跳机, 5 000 万人失电。下面根据事故调查的中期报告^[4]对此次事件进行分析。

事故序列分为以下几个阶段。

a. 当日 15:05 以前在 First Energy(北部 Ohio 州调度中心,简称 FE)控制区域,尽管若干主力机组和线路停运,系统稳定运行并且能够应付大约 800 个 $N-1$ 故障。但此时系统已经处于重载状况。此外,属于 PJM(宾州、新泽西州、马里兰州)控制区域的 AEP(美国电力公司)与 DPL(代电电气公司)之间的 345 kV 线路 Stuart—Atlanta 因接地故障而跳闸,但 MISO(负责 Ohio, Michigan, Minnesota, Indiana, Illinois 等区域的调度中心,FE 的上级调度)没有监视此线路状态,状态估计没有正确反映,导致后来状态估计错误。FE 的 EMS 也没有正常运行。

b. 15:05 至 15:39,风速减小,线路散热减慢,输电走廊的植物生长也超过预计,线路重载(但没有过载)自然下垂加剧。线路潮流在长期极限内,但一系列线路接地故障仍然发生,造成 3 条 345 kV 重要线路过载并跳闸。此时,如果减载 1 500 MW ~ 2 500 MW,系统也许还可以继续稳定运行,但 FE 由于计算机故障,没有认识到事件严重性,没有这样做。在此期间,由于缺乏 FE 系统数据,PJM 和 AEP 也没有正确认识到系统的危险程度。

c. 15:39 至 16:08,主干线路跳闸后,138 kV 系统立即过载并跳闸,随后更多的 345 kV 线路受到影响继续跳闸,形成连锁反应。在此期间,系统潮流剧变,导致保护误判,扩大了线路跳闸范围。

d. 16:08 至 16:11,大批线路跳闸导致系统电压降低,机群之间振荡,三段距离保护动作,最后故障波及整个东北网络,大批机组跳机,负荷减载,系统解列为若干孤岛。

调查认为以下是大停电事故主要原因^[4]:

a. FE 因为计算机故障没有进行 $N-1$ 事故分析,调度员对系统状态失去监视。当发现系统危险

时,调度员间的沟通花费了宝贵的事故处理时间,在沟通时,系统继续恶化。计算机系统故障且没有良好的备用计算机系统是“8·14”大停电有别于美国历史上其他故障的地方。

b. FE 没有有效地监视植物生长对系统安全的影响。这也是以前多次北美大停电事故的原因。

c. MISO 由于没有及时维护状态估计器,未能对系统危险状态进行紧密监视,也未能向 FE 提供正确的系统信息。MISO 采用离线数据进行输电断面输送容量计算,这使得 MISO 没有准确掌握系统信息。MISO 未能及时掌握断路器操作信息。PJM 和 MISO 缺少处理控制区域之间联络线过载的预案。

调查还发现^[4]:

a. FE 和 MISO 调度员缺少良好培训(一般调度员只有高中毕业),特别是应付 8 月 14 日这样恶性紧急事故的培训。

b. 发电机因为以下几个原因而跳机:低频或者高频保护(这是最主要的跳机原因),励磁系统低压保护(防止励磁线圈过热),厂用电电压过低影响电厂热力系统和辅机系统。

c. 事故前,MISO 区域无功备用少。FE 控制区域电压下限为 0.92(标幺值),而一般北美控制区域采用 0.95(标幺值)。

d. 没有发现通过互联网进行信息攻击的现象。信息安全问题如果存在,也不严重。也没有发现人为破坏情况。所有核电机组都正确跳机,没有带来核危险。

这次大停电事故似乎可以得到如下启示:

a. 事故起因在于在线静态安全分析和状态估计工具不力,调度员无法应对,线路因为过载和接地故障而连锁跳闸,属于 MISO 区域静态问题。

b. MISO 接地故障和线路连锁跳闸导致事故期间全系统振荡以及潮流串动,引起扰动的扩散,并且最终发展为大停电。尽管在事故期间电压稳定问题发生,但其是 $N-3$ 和 $N-4$ 事故的结果而不是起因。

c. 当系统失去许多线路后,自然发生暂态稳定和电压稳定问题。此时,进行暂态稳定计算和电压稳定计算已经多余并且也不可能(因为需要进行 $N-X$ 事故仿真,这里 X 很大)。

d. 对北美这样联系紧密的系统,从现有技术来看,开发能够全面阻止大停电的稳定控制系统还有难度,主要困难表现在控制策略的设计。当然,暂态紧急稳定控制系统能够将某些局部事故的影响降低。因此,制定周密的解列计划应当得到重视。

e. 保护动作设计不尽完善,加剧了事故影响,特别是三段距离保护设计。

f. 系统低频减载是为了维持系统供需平衡设计的,而发电机组低频和高频跳机是为了保护发电机组免受损失。显然,低频或者高频保护应当适当协调以减少损失,但停电发生期间纽约的频率曾经在 57 Hz~63 Hz 变化,说明低频或者高频发电机保护没有很好协调。

4 结语

意大利大停电和美加大停电事故的直接起因都属于输电走廊植物生长引起的静态潮流越限问题。计算机系统性能不完善使得问题未能及时发现。提高电力系统在线计算机监控与应用水平,保证计算机系统可靠性是类似防止大停电事故的必要条件。应当严格管理输电走廊植物生长,在线监视与气温、天气潮湿程度等因素密切相关的输电线路热稳定极限。

系统失去同步和电压稳定并非意大利大停电和美加大停电事故的直接起因,但是其实际上在意大利扮演了“罪魁祸首”的角色,在美加则加剧了系统崩溃,扩大了事故范围。提高稳定性预防控制和紧急控制水平,将有助于防止系统崩溃。

瑞典—丹麦大停电的起因是电网设计中的“大机小网”问题。这样的问题,只有在电源和电网设计时加以考虑,才有可能避免。

良好的紧急控制系统,特别是低频低压减载系统可以减少损失。可以想像,如果瑞典南部地区有性能良好的低压低频减载系统,或许丹麦东部大停电就可以避免。研发低压低频减载紧急控制的一个必要基础是长期动态仿真软件,中国似乎少有这方面的投入。在研究长期动态仿真问题时,必须考虑负荷的低压低频跳变行为。

本文介绍的 3 次大停电的研究报告都没有报道事故与电力市场的直接联系。因此,市场可能并非罪魁祸首。实际上,在市场化以前,许多国家也发生了大停电。但是,意大利大停电多少受到电力市场的间接影响,因为电力市场交易导致系统潮流变化加剧。因此,在电力市场环境下需要加强实时电网安全监视与分析。

电力系统是人类制造的复杂机器,防御大停电事故是一个庞大的系统工程,需要综合考虑电网控制技术、电网规划和运行管理、政策法规与经济利益、研发与培训等多方面因素。与大停电紧密相关的基础研究,比如跨区域电力系统长期动态行为分析与仿真、系统连锁故障防御与控制等课题都需要长期、持续、高额的投入。建立电力企业研究基金资助类似基础研究是一种有效的办法。

(下转第 9 页 continued on page 9)

<http://www.epri.com>(美国电力科学研究院网站)

- 韩祯祥(1930—),男,中国科学院院士,从事电力系统稳定控制等多方面研究。