

西欧大停电事故分析

李再华, 白晓民, 丁 剑, 周子冠, 方 竹

(中国电力科学研究院, 北京市 100085)

摘要: 2006 年 11 月 4 日, 西欧 8 个国家发生了欧洲 30 年来最严重的停电事故, 欧洲输电协调联盟 (UCTE) 和德国 E.ON 公司先后公布了事故调查分析报告。文中简要介绍了大停电基本情况, 然后对事故报告进行了讨论分析, 提出了增强电网运行管理的措施。最后指出电网动态监控系统的开发和应用有助于预防连锁故障、提高运行可靠性。

关键词: 大停电; 过负荷; 连锁故障; 电力市场

中图分类号: TM712; TM73

0 引言

2006 年 11 月 4 日 22:10 (德国时间, 下同), 西欧 8 个国家发生了大面积停电事故。这是欧洲 30 年来最严重的一次停电事故, 1 000 多万人受到影响^[1]。这也是继 2003 年北美“8·14”大停电之后又一次严重的大停电事故, 引起了德国乃至欧洲各国的极大震动, 更引起了人们对互联网可靠性的新的重视和思考。

事件的起因是: 德国最大的能源公司——E.ON 电网公司为了让迈尔 (Meyerwerft) 造船厂新的“挪威珍珠”号轮船通过埃姆斯 (Ems) 河驶入北海, 断开了河上从 Conneforde 到 Diele 的 380 kV 双回线路。经协商, 于 11 月 4 日 21:38 进行开断操作, 22:10:13, Landesbergen 到 Wehrendorf 的线路由于过负荷保护跳闸。随之发生的一系列连锁跳闸, 导致欧洲输电协调联盟 (UCTE) 电网解列为 3 块, 并大量切机切负荷。

1 各方面对事故的分析

德国政府要求立即解释原因, 德国经济部长格罗斯表示, 德国经济部将与有关企业一起想办法, 防止类似事件再发生。德国环境部长加布里埃尔说, 能源公司需要继续对电网扩容并更换老旧线路。

E.ON 公司的发言人首先回应, 该事故可能是风力供电量增加, 而供电部门没有及时减少核能等其他发电出力, 导致供电配给的失调, 以至影响到整个西欧电网。该发言人还提到另一个原因: 随着冬

季到来的天气变化, 4 日晚德国西部气温突然降到冰点, 民众用电量暴增, 导致了跳闸停电。而西欧电网的安全系统为防止供电系统的全面崩溃自动切断了一部分电力消耗, 从而导致法国等西欧国家的部分地区出现停电事故。

UCTE 于 11 月 6 日公布的停电事故后续分析及处理报告确认本次事故起源于德国西北部^[2]。4 日 21:42, Conneforde 至 Diele 的双回 380 kV 线路正常停运, 潮流转移至系统南部的联络线, 导致其他输电线路负荷过重。其后, E.ON 电网的负荷进一步增加, 特别是德国 RWE 电网的 Wehrendorf 站至 E.ON 的 Landesbergen 站的线路潮流较重。22:10, Wehrendorf 至 Landesbergen 的线路和 Bechterdissen 至 Elsen 的线路跳闸, 并引起一系列相继跳闸。

法国 RTE 公司表示, 德国电网失灵破坏了欧洲电网的平衡, 西部电力输入不足, 导致法国电力严重不平衡。法国 RTE 公司电脑系统正确切断了对部分用户的供电, 避免了全法国大停电。

德国 RWE 公司说: “我们和很多欧洲国家电网有相互联系, 因此停电事故难以避免会对一些国家有严重影响。德国 RWE 公司的系统安全装置动作正确, 防止了频率崩溃。”

意大利总理普罗迪认为, 连锁停电表明, 各电网公司调度运行规程需要统一, 欧洲需要一个统一的电力监管部门。

根据澳大利亚 Commonwealth 银行的一份报告, 欧洲电力市场的风险正在增大, 是因为其电力市场存在下述问题: ①欧洲市场缺少统一的监管部门, 由几个行业组织负责; ②统一市场进程远远没有完成, 行业参与分散, 竞争不够有效; ③电网设施投资逐年缩小; ④能源 (如煤炭、天然气) 价格上涨; ⑤二

氧化碳排放价格上涨。

法国工业部长洛斯表示,2003年北美大停电和此次停电事故有相似之处,表明欧洲需要对电力供应加大投资。

有关人士指出,这次事故不是偶然的。这次大停电与德国电力线路不足、电网负荷过重有关,他们指责德国电力公司只知追求利润,而无视电网的维护和扩建。德国电力消费者联合会主席彼得斯认为,德国的供电安全早已出现问题。据德新社报道,2005年11月,西部北莱因-威斯特法伦州 Münsterland 地区由于覆冰破坏,导致 50 个杆塔断裂,造成了 Münsterland 地区停电。根据德国 RWE 公司 2003 年的档案记载:60% 的杆塔有严重的材料缺陷,有倒塌的危险。这些杆塔的主要材料是托马斯转炉钢,含氮量高,年久易发生脆断。换建 4 500 座高危险杆塔的造价大约是 7 亿马克。电力消费者联合会呼吁电网公司应长期负责。

欧洲一家专业机构发表的电力市场研究报告指出,在未来几年中,由于电力需求增长超出新建电站增长,欧洲长期面临的电力供应短缺问题将加剧,潮流交换将继续增长。以 2005 年为例,欧洲电力备用容量占总发电容量的比例由 2004 年的 5.8% 下降到 4.8%,为历史最低水平。

2 事故处理过程分析

2.1 线路断开之前的准备工作

迈尔造船厂常有大船出厂。自 1995 年以来, E. ON 电网控制中心已经为迈尔造船厂成功地进行进行了 14 次线路开断操作。10 月 27 日, E. ON 电网控制中心根据标准负荷预测数据对 Conneforde 到 Diele 的 380 kV 线路开断进行了分析,分析结果认为该操作不违背 N-1 准则,计划于 11 月 5 日 1:00 进行开断操作。

控制中心预测 22:00 东部的负荷将会比较大,而东部的风力发电出力将比较小,所以自东向西的潮流较轻,提前操作更合适。但 10 月 27 日的计算只是一个粗略计算^[1]。笔者认为:东部 VE-T 电网的负荷预测不太准确。实际上,当时东部的风电出力较大,自东向西的潮流较重,开断时机选择不十分合理。因为深夜联络线潮流将会减小,如果风电出力到深夜仍然较大,应该关闭部分风电机组,以减轻线路开断的运行风险。

2.2 线路断开之前的电网运行形势

11 月 4 日 21:30 左右, E. ON 电网的负荷约 13.7 GW,但是此时风电出力较大,达到 3.2 GW,导致 E. ON 电网的发电出力总计达到 14.1 GW。

另外, E. ON 电网的过网负荷约 7.3 GW。负荷预测估计 E. ON 电网的负荷从 18:00 开始下降,风电出力将从 19:00 的 3.0 GW 开始上升,次日 3:00 达到 4.5 GW。此时潮流主要流向西南方向,即从 Conneforde 流向 Diele,从 Landesbergen 流向 Wehrendorf,这种流向是正常情况。而且, E. ON 最近在进行电网改造,有些线路和设备已经断开或计划断开,这些线路和设备有:① Krümmel 到 Hamburg 的 380 kV 线路断开;② Conneforde 到 Diele 的 380 kV 双回线路计划断开;③ Godenau 经 Hardeggen 到 Göttingen 的 220 kV 线路断开;④ Borken 变电站由双母线改单母线方式运行;⑤ Oberbachern 到 Oberbrunn 的 380 kV 线路(降压到 220 kV 运行)断开。

由于网络拓扑结构的这种变化,线路断开之前的系统潮流已经较大,而安全裕度和可靠性已经明显降低。在当时的恶劣气候情况下,各电网的负荷中心应该加大热备用发电容量,加大输电的冗余度。

2.3 11 月 4 日 21:29 到 22:10 之间处理过程

开断操作初始,电网潮流还和仿真计算结果一致。21:39,收到过负荷报警信息;21:41, E. ON 和 RWE 的联络线 Wehrendorf 到 Landesbergen 的电流逼近安全极限;21:46, E. ON 等几大电网一致认为电网处于紧急状态。22:00,控制中心根据计划进行了运行调整。但是,22:05 调整结束后,潮流发生了未预计到的变化,导致 Landesbergen 到 Wehrendorf 线路负荷升高 100 MW。E. ON 拟削减联络线功率 50 MW,立即将 Landesbergen 变电站改为母线连接方式运行。实际上功率反而增加,直接导致一系列过负荷跳闸。这些跳闸事件具有很明显的连锁效应(参见图 1),导致 UCTE 电网解列(参见图 2,以虚线分隔),大量削减负荷和出力。

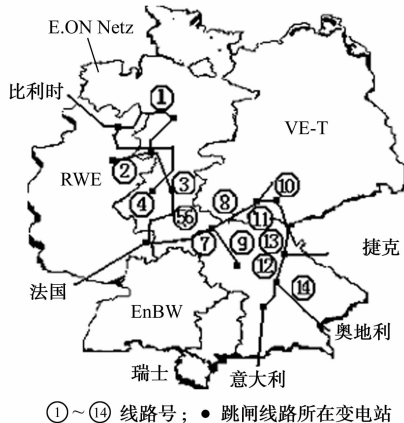


图 1 德国电网相继跳闸示意图

Fig. 1 Chart of cascading skips in Germany Grid

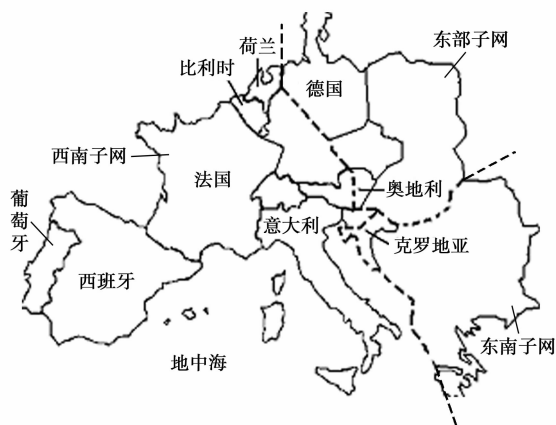


图2 解列后的欧洲电网地理图
Fig.2 Map of divided UCTE power grids

这里调度员犯了3个错误:

1)虽然实时仿真计算结果没有指出开断操作将导致越限,但是调度员根据经验认为满足 $N-1$ 准则是轻率的,因为网络改造导致多处断开,开断的后果已经不同于正常电网的 $N-1$ 。而从21:46的告警到22:10,有24 min的时间和一系列报警信息来帮助发现这个疏忽。

2)当E.ON电网和RWE电网间联络线电流越上限后,E.ON电网的控制中心没有立即采取措施。实际上Wehrendorf侧并不允许负荷电流短期超过25%,线路两侧整定不一致竟然存在了很久。这对电网运行可靠性来说是一种隐患。

3)E.ON没有经过和RWE协商,完成了Landesbergen变电站母线运行方式的切换,导致联络线功率反而增加,线路功率增加了42 MW。如果E.ON提醒RWE控制负荷,事故或许可以避免。

2.4 11月4日22:10之后发生的事件

由于电源分布和负荷分布不均衡,东部子网继续解列。东部频率很快上升到50.6 Hz,2.6 GW的风电自动关闭,调度员还关闭了一批电源,并开启了抽水蓄能电站。而此时,东南子网和西南子网正缺少输入功率,西南子网频率很快下降到49.0 Hz,东南子网频率很快下降到49.7 Hz。为了恢复功率平衡,各电网公司切除了部分负荷。

减载避免了各子网的彻底停电和黑启动,这也是短期内迅速稳定电网的先决条件。22:47,欧洲电网恢复连接。此后,各地区用户的供电陆续得到恢复。

E.ON的事故分析报告认为这里调度员动作正确、果断,安全自动控制装置动作正确。应急预案发挥了重要作用。但是,笔者认为:解网后又有众多机组解列,导致大量负荷被切除。除了功率没有在网内平衡外,机网协调方面也值得探讨。解网后,风电

的频率适应性没有发挥出来;西南电网频率偏差未超过1 Hz,东南电网频率偏差未超过0.3 Hz,但是都立即开始切机,说明切机时机过早,影响了电网的可靠性。

3 结语

本次事故是一次典型的跨区域连锁故障,起因是超过预测的潮流以及网络的多重开断共同引起的过负荷,在故障发展过程中起重要影响的因素有以下5点:

- 1)电网间联络线的负荷预测值不一致;
- 2)电网间继电保护整定值不一致;
- 3)各电网的备用发电容量不足,尤其是恶劣气候等紧急情况下热备用容量不足;
- 4)紧急状态下削减负荷的措施不一致;
- 5)调度员对预警信息不够重视。

“8·14”大停电之后,许多文献总结提出了有益的启示和教训^[3-9],值得借鉴。我国电网“西电东送”、“南北互供”的发展趋势将增加发生跨区域连锁故障导致大停电的可能性。因此,除了加强统一调度,互联的电网间、厂网间也要加强数据和信息共享;还要重视预警信息和故障信息的快速分析,帮助调度员快速决策处理突发事件。加强电网动态监控系统的开发和应用,是发现和抑制运行风险的有效措施^[10]。

感谢中国电力科学研究院副总工程师汤涌博士为本文提供的宝贵资料和指导。

参考文献

- [1] E.ON Netz GmbH. Report on the status of the investigations of the sequence of events and causes of the failure in the continental European electricity grid on Saturday, Nov 4, 2006, after 22:10 hours. Bayreuth (Germany): E.ON Netz GmbH, 2006.
- [2] UCTE. First facts about the system disturbance on 4 Nov. Brussels (Belgium): UCTE, 2006.
- [3] 甘德强,胡江溢,韩祯祥,等. 2003年国际若干停电事故思考. 电力系统自动化,2004,28(3):1-4,9.
GAN Deqiang, HU Jiangyi, HAN Zhenxiang, et al. After the 2003 blackouts across several continents. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 1-4, 9.
- [4] 周孝信,郑健超,沈国荣,等. 从美加东北部电网大面积停电事故中吸取教训. 电网技术,2003,27(9).
ZHOU Xiaoxin, ZHENG Jianchao, SHEN Guorong, et al. Draw lesson from large scope blackout of interconnected North American Power Grid. Power System Technology, 2003, 27(9).
- [5] 赵希正. 强化电网安全,保障可靠供电. 人民日报,2003-09-20.
ZHAO Xizheng. To Strengthen the security of power grid and safeguard power supply. Peoples Daily, 2003-09-20.

(下转第32页 continued on page 32)

- [6] 薛禹胜. 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. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 1-5, 37.
XUE Yusheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster lessons from the eastern interconnection blackout in 2003. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 1-5, 37.
- [7] 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 Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part I From isolated defense lines to coordinated defending. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16.
- [8] 傅书遏. 电网安全问题综述及防止大面积停电事故建议. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 1-4.
FU Shutu. Summary on power system security problems on 2004 IEEE PES meeting and recommendation for developing defense measures. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 1-4.
- [9] 唐斯庆, 张弥, 李建设, 等. 海南电网“9·26”大面积停电事故的

分析与总结. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 1-7.

TANG Siqing, ZHANG Mi, LI Jianshe, et al. Review of blackout in Hainan on September 26th Causes and Recommendations. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 1-7, 16.

- [10] BAI Xiaomin. Research and development on online operation reliability assessment and control// Proceedings of International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Jul 9-13, Yongpyong, Korea. 2006.

李再华(1974—), 男, 博士研究生, 从事电力系统调度自动化、电力系统可靠性的研究及软件开发工作。Email: lizaihua@epri.ac.cn

白晓民(1951—), 男, 副总工程师, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统调度自动化、电网安全、人工智能、电力市场的研究工作。

丁剑(1977—), 男, 博士研究生, 从事电力系统调度自动化、电力系统可靠性的研究及软件开发工作。

Analysis of the Western Europe Blackout

LI Zaihua, BAI Xiaomin, DING Jian, ZHOU Ziguan, FANG Zhu
(China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: On November 4, 2006, a large scope blackout was occurred in 8 countries of Western Europe, which is the most serious failure in Europe in the recent 30 years. Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity(UCTE) and E.ON Corporation released their reports of investigations successively. This paper introduces the case and its analysis of “11·4” blackout, and discusses these reports, brings forward some methods to strengthen operation. At last, it is indicated that developing and application of dynamic SCADA system will be valid to avoid cascading failure and improve operation reliability.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217901).

Key words: blackout; overload; cascading failure; electricity market