

伦敦南部地区大停电及其教训

唐葆生

(大连供电公司, 辽宁省 大连市 116001)

BLACKOUT IN SOUTH OF LONDON AND ITS LESSONS

TANG Bao-sheng

(Dalian Power supply Company, Dalian 116001, Liaoning Province, China)

摘要: 根据英国国家电网公司的事故调查报告对 2003 年 8 月伦敦南部电网停电事故的情况、原因、过程以及调查结论做了详细的介绍, 并就我们今后应吸取的经验教训提出了看法。

关键词: 伦敦大停电; 电网; 安全; 电力系统

1 引言

今年夏季美加电网、英国伦敦南部电网和瑞典、丹麦等先后发生了几次有着重要影响的大面积停电事故。伦敦南部地区的停电是一个典型的由技术问题引起的事故, 全面了解和分析这次事故, 吸取经验教训, 对于我们今后的电网运行有着积极的意义。

2003 年 8 月 28 日, 英国国家电网公司所属的伦敦南部电力传输系统出现故障, 导致该系统从 18:20 至 18:57 电力供应中断。停电影响了 EDF 能源公司的 410000 个用户, 事故主要发生在伦敦南部地区, 东至 Bexley, 西至 Kingston, 北至 Bankside, 南至 Beckenham, 停电共损失负荷 724MW, 约为当时整个伦敦负荷的 20%。

这次大面积停电事故发生在下班高峰期, 严重影响了伦敦地铁和铁路运营, 给地铁和地面交通带来了严重混乱, 许多地区交通信号灯和路灯熄灭, 近三分之二地铁运营中断, 约 50 万乘客受到影响。虽然从其他输电系统向 EDF 能源公司配电系统的供电在 37min 内恢复, 但伦敦电力供应全面恢复花费了近 1h 的时间。伦敦的许多市民对这次停电事故极为不满, 伦敦市长认为这起事故是“完全不能容忍的”。

2 事故起因及过程

2.1 伦敦南部输电系统

英国国家电网公司的输电系统是一大型电网,

为整个英格兰和威尔士输送电能。该输电系统连接主要发电站, 并向地区性配电网系统送电, 电压等级为 400kV 和 275kV。英格兰和威尔士输电系统的高峰负荷在 54400MW 左右, 大伦敦地区负荷大约为整个输电系统负荷的 20%。

伦敦中央地区没有大型发电站直接与输电系统连接, 但在伦敦附近的 Barking、Grain、Littlebrook 和 Kingsnorth 都有大型发电站。输电系统将这些发电站和更远方发电站的电力输送到伦敦。伦敦南部 Wimbledon 至 Littlebrook 的 275kV 输电网络示于图 1。

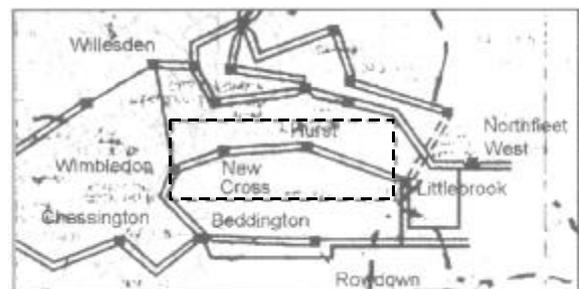


图 1 伦敦南部地区输电系统图

2.2 事故前的运行方式

2003 年 8 月 28 日傍晚, 伦敦南部地区输电系统正常运行, 所有变电所都在安全的方式下运行, 提供着正常的负荷, 约 1100MW 左右, 此时该系统安排了几条线路停电检修。Wimbledon、New Cross 和 Hurst 等受影响的变电所连接在其他的两条输电线路上, 以保证在一条线路故障的情况下不中断供电。图 2 为图 1 虚线框中输电系统的简单示意图。

2.3 事件经过

事件是从 8 月 28 日 18:11 开始的, 此时的系统运行方式和电力潮流如图 3 所示。当时位于

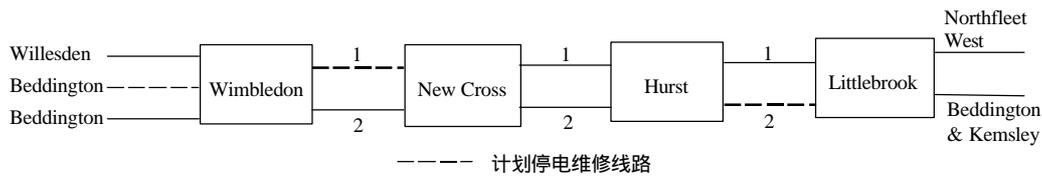


图2 伦敦南部输电系统示意图

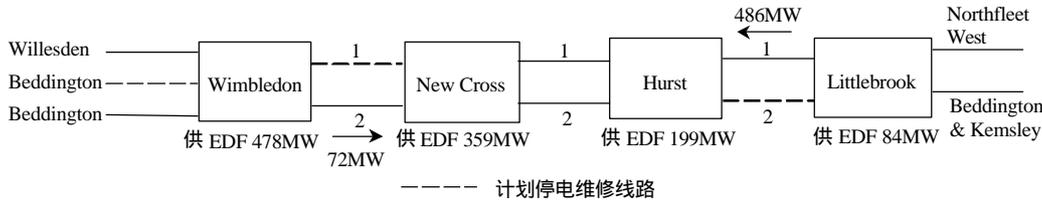


图3 输电系统运行方式和电力潮流

Wokingham 的国家电力控制中心 (National Control) 收到了 Hurst 变电所变压器或并联电抗器的“瓦斯继电器报警”信号,它表明设备中的油产生了大量气体,可能导致严重的设备故障。

18:17, 国家电力控制中心和 EDF 能源公司认为 Hurst 变电所的变压器或者并联电抗器出现了问题。国家电力控制中心通知 EDF 能源公司将这个变压器切除,退出运行。为此,输电系统必须倒闸操作,切换设备和线路,重新安排系统的运行方式,使受到影响的设备可以安全地退出运行。在倒闸操作期间(一般为 5~10min),New Cross 和 Hurst 将由一条线路供电,即 Wimbleton—New Cross 线路。

EDF 能源公司确认,他们已经将配电系统的负荷从这台变压器倒换出去。由于这些配电系统仍将与 Hurst 的其他 2 台变压器连接,将不会对 EDF 能源公司的其他设备有任何影响。

18:19, Littlebrook 至 Beddington&Kemsley 的线路合闸。这一运行方式的改变,可保证 Littlebrook 变电所潮流在 Hurst 和 Littlebrook 1 号线路切除时,使 Hurst 的 3 号变压器和并联电抗器退出运行。

18:20, Hurst 的两个断路器断开,使变压器和并联电抗器退出运行,此时 Hurst 和 New Cross 变电所由 275kV Wimbleton 变电所供电,并依赖于单一的 Wimbleton 至 New Cross 的 2 号线路供电,此时的输电系统见图 4。

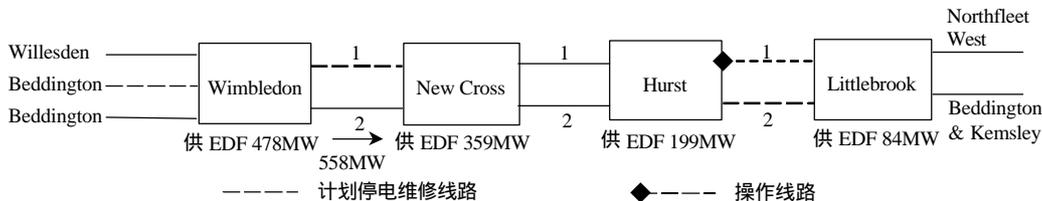


图4 18:20 的输电系统

紧接着 Hurst 两个断路器的断开, Wimbleton 和 New Cross 之间的 2 号线路的自动保护继电器动作,自动地将 Wimbleton 的两个断路器跳开,并使 Wimbleton 向 New Cross 送电的 2 号线路退出运行。这个动作,将 New Cross、Hurst 和 Wimbleton 变电所的一部分从系统中解裂出来。New Cross 和 Hurst 失去全部负荷, Wimbleton 向 EDF 能源公司供电的

132kV Wimbleton 变电所也失去 35% 的负荷。Wimbleton 的两台变压器继续向 132kV Wimbleton 变电所供电。此时输电系统的结构和状态如图 5 所示。

事件发生后,EDF 能源公司通过倒换配电系统的运行方式将 132kV Wimbleton 变电所的 72MW 负荷转移到其他的电源点上。

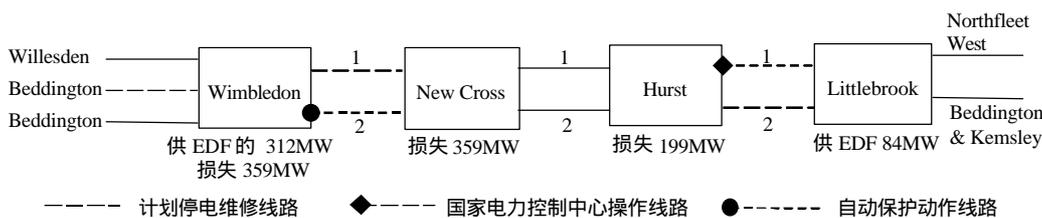


图5 事件当时的输电系统

通过检查收到的报警信号,国家电力控制中心断定 Wimbledon 至 New Cross 2 号线路的继电器动作很可能是错误的。

18:21,国家电力控制中心和 EDF 能源公司研究停电和受影响的变电所的问题。

18:22,现场工程师被派往 Wimbledon、New Cross 和 Hurst 变电所进行调查,帮助恢复送电。

18:23,国家电力控制中心开始了一系列恢复其他系统安全性和恢复送电的操作,决定维持 Wimbledon 至 New Cross 2 号线路停电,一直到查明继电器动作原因为止。如果恢复其送电,很可能再次发生自动退出运行的情况。

18:25,系统安排隔离 Wimbledon 至 New Cross 的 2 号线路,同时在 Wimbledon 变电所将先前由继电器自动断开的两台断路器合上,全面带电。这些措施重新保证了输电系统抵御再次故障的能力,减少了进一步停电的可能。由于对继电器动作原因不明,重新带电的变压器没有立即向 EDF 能源公司的 132kV Wimbledon 变电所恢复送电,但 Wimbledon 的两台变压器能够承担在整个事故中仍然剩余的全部负荷。

在 18:25 重新保证系统的安全之后,恢复的策略是从 Littlebrook 开始使网络重新带电,这需要一系列复杂的操作来为输电和配电系统做准备,并小心地操作电缆线路,控制电压,以减小进一步故障的风险。

到 18:30,经过进一步调整系统运行方式,Hurst 和 New Cross 变电所的第一段重新带电。

18:31,国家电力控制中心向 EDF 能源公司调度中心通报这些情况,并告之很快就将恢复供电。

18:38,国家电力控制中心通知 EDF 能源公司调度中心,可以向 132kV Wimbledon 变电所恢复送电,向 New Cross 的送电也可以恢复。EDF 能源公司调度中心要求给以时间对配电网进行评估。

到 18:40,完成了网络运行方式的进一步调整,New Cross 和 Hurst 的其他部分带电。

18:40,国家电力控制中心与 EDF 能源公司调

度中心联系,提出从 Hurst 开始恢复供电。EDF 能源公司对配电网运行方式进行了调整,EDF 能源公司的 Bromley 在 18:44 恢复供电。这大约恢复了 18:20 时 410000 个停电用户中的三分之一。

18:44~18:50,进一步调整输电系统的运行方式。

18:48,国家电力控制中心与 EDF 能源公司调度中心联系,全面恢复 132kV Wimbledon 变电所的送电。18:52,所有剩余的 132kV Wimbledon 网络变电所供电得以恢复。

18:51,又收到一个 Hurst 变压器和并联电抗器的瓦斯继电器报警信号,但没有收到任何变压器被保护自动切除的信息,表明故障设备是并联电抗器。

18:52,国家电力控制中心与 EDF 能源公司调度中心联系,恢复 New Cross 的供电。EDF 能源公司调度中心要求给时间在恢复送电之前评估配电网。至此,在 26min 之内,29 步倒闸操作方案已经制定和成功执行。

18:56,EDF 能源公司调度中心回复国家电力控制中心,New Cross 向 EDF 能源公司的供电在 18:57 恢复。至此,所有向配电系统的供电全面恢复。

19:10,EDF 能源公司调度中心与国家电力控制中心联系,要求 Hurst 的变压器恢复送电,以增加配电系统的安全性。初始的瓦斯继电器报警可断定是并联电抗器故障,并且已被隔离,EDF 能源公司调度中心的要求得到了满足。

19:14,EDF 能源公司调度中心确认所有用户已经恢复供电。

在 19:00~19:45 这段时间里,现场工程师到达了三个现场。在现场,每个工程师都检查了保护继电器的指示和报警记录,并向国家电力控制中心汇报了情况。为了支持恢复供电和开展调查,另外两个工程师也被派往现场和现场工程师一起工作,直到恢复工作全部结束。网络此时的运行方式如图 6 所示:

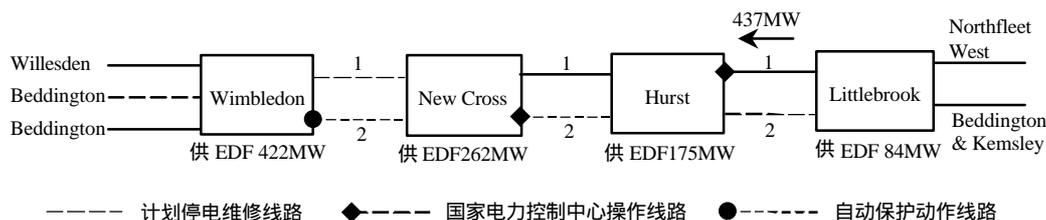


图 6 恢复后的输电系统

在 Wimbledon 现场,经工程师评估,证实动作过的继电器已经退出了运行,Wimbledon 至 New Cross 的 2 号线路在 23:00 重新投入运行。这个措施进一步加强了 Wimbledon 和 Hurst 的安全性。通过夜间调整系统的运行方式,在 8 月 29 日 01:05 系统重新建立了全面的安全性。

从停电开始,国家电力控制中心的工程师们正确地评估了风险,在 37min 内恢复了输电系统的供电。

3 造成停电的原因及其影响范围

3.1 瓦斯继电器的报警

瓦斯继电器报警是这次事故发生的起因,值得注意的是这个报警信号到达调度中心的时候是被组合了的。这个报警表示变压器或电抗器存在问题。在正常的调度室系统设计中,为避免重要系统事件中的“报警泛滥”,通常将报警信号组合,以减少调度室报警显示数量。所以本次故障中调度中心无法判断是变压器还是电抗器发生了故障。在调查中注意到,变压器或电抗器报警的组合和命名未能清楚地表明是变压器还是电抗器引起的瓦斯报警。

英国国家电网公司规程规定,除非有特定条件限制,才能将设备从输电系统中切除,这些特定条件包括任何将导致停电的行为。然而值得注意的是,如果可以确定不是变压器产生的报警,那么是不会发生后面的事件的。

在收到报警之后,国家电力控制中心采取了迅速的行动,将变压器从系统中切除,并要求 EDF 能源公司从该变压器上切除其配电系统。

3.2 变压器的退出运行

调查证实,考虑到变压器严重的故障风险,切除 Littlebrook 至 Hurst 和 Wimbledon 至 New Cross 的单条线路,在操作的 5~10min 内的供电的运行决策是符合运行规程的。

为了将变压器从输电系统中切除,国家电力控制中心采取了进一步的倒闸操作,变电所设计要求将 Littlebrook 至 Hurst 的线路切除。这一操作计划的执行是根据英国国家电网公司关于运行网状变电所的规程施行的,在 5~10min 的时间内完成倒闸操作,使 New Cross 和 Hurst 变电所在此期间以单面线路供电是符合规程要求的。

切除 Littlebrook 至 Hurst 线路使电力潮流发生了变化,如预期的那样,Wimbledon 至 New Cross 2 号

线路的电力潮流由 72MW (213MVA) 增长至 558MW (695MVA),也完全在线路 815MVA 的设计容量额定值范围内。

3.3 意外的继电器动作

在英国国家电网公司的 Wimbledon 变电所,Wimbledon 至 New Cross 2 号线路上的自动保护设备检测到了在 Hurst 的倒闸操作所引起的潮流变化,并将其认作故障,因此跳开了此线路,以防止损坏其他设备和/或故障通过输电系统传播。

在本次事件中,动作的保护继电器是用作后备保护的,后备保护与主保护一起安装在输电网络中。动作的保护设备是一个常用型号的最小反时限 (IDMT) 继电器。当线路上的电流超过一定限值时开始启动,动作的速度取决于所测量的电流超出限值多少。

在设计阶段,这个保护继电器的技术规定是正确的,并且定值单的编制也是正确的。然而在 Wimbledon,该继电器的实际供货和安装却是一个额定值为 1A 的继电器,而不是定值单上规定的 5A 继电器。在所有其他方面,这个继电器的技术参数都是正确的,并且在安装和调试过程中的几个检查点上都被确认。

安装了 1A 而不是 5A 的继电器意味着所保护的电流动作值将降低到正确额定值的 1/5,低于线路的自身额定电流。

1A 的保护继电器的动作定值是线路上的电流 1020A,而在事发当天触发的电流是 1460A。这个值远远低于电缆的 4450A 的运行容量,原始的保护继电器技术要求是在 5100A 动作。

该保护继电器是在 2001 年 6 月作为更换计划的一部分调试的,事故后对所有用于该地区自动保护的都进行了调查,发现安装都是正确的。在英格兰和威尔士已经开始了对所有变电所类似设备的全面调查,在已经完成的 20% 中,没有发现相同情况。

事件调查发现,尽管有严格的程序控制,在 Wimbledon 变电所仍然有错误的保护继电器被安装和运行,造成了 Wimbledon 至 New Cross 的 2 号线路意外自动切除,并造成了停电。在用于调试的文件中,自动保护设备额定容量应该更清楚些以便调试工程师查看。调查中没有发现忽略调试过程的任何部分。

调查结果表明,停电的直接原因是 Wimbledon

至New Cross的2号线路上的后备保护继电器的不正确动作。

3.4 EDF 能源公司变电所的结构

EDF能源公司的132kV Wimbledon变电所与国家电网公司的变电所不在同一位置,停电维修计划是国家电网公司和EDF能源公司一致同意的程序明确规定的一部分,网络运行方式和故障应急方案等重要信息也都是经过沟通的。

在Wimbledon 有国家电网公司275kV变电所的4台变压器向EDF能源公司网络供电,正常情况下该4台变压器都运行,任何一台变压器故障都可以保证安全供电。EDF能源公司为了减小故障电流和防止设备过出力将其Wimbledon变电所分裂成两部分。正常情况下,每部分由两台变压器供电。

当国家电网公司需要将某台变压器退出运行进行维修时,EDF能源公司网络的运行方式是由一台变压器为一部分供电,而由另外两台变压器为另一部分供电(见图7)。两台变压器供Wimbledon 和Wandsworth的大部分负荷,剩余的一台变压器供Wimbledon和Wandsworth的剩余负荷,以及Lots Road的伦敦地铁负荷。

如果一个变压器退出运行进行维修,Lots Road的线路就总是依赖于一条输电线路供电,因为它只能接入一台变压器。

2003年8月28日,132kV Wimbledon网络变电所的运行方式如图7所示,在整个事件过程中,国家电网公司维持向2号和4号变压器部分供电。

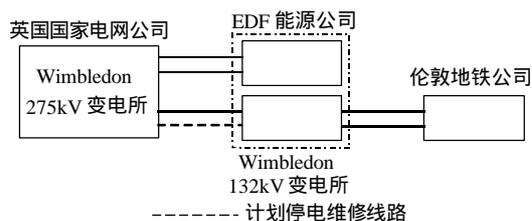


图7 EDF 能源配电系统结构

国家电网公司知道,在一台变压器停运时若其剩下的另一台变压器发生故障,EDF能源公司的正常安排是将Wimbledon电网的132kV变电站的两部分连接起来,但它不知道在某些特定的情况下,EDF能源公司是否能采取这种事故后措施。事实上,EDF能源公司配电系统的运行方式并不是本次事故中起决定作用的因素。然而,更快速地实施故障后措施或以另一种运行方式替代也许能减轻整个事件的影响,减少停电时间,缩小停电范围。

4 事故调查结论

英国国家电网公司在事故后迅速进行了调查,并就事故做出了如下结论:

(1) 计划的维修工作是符合国家电网公司政策的,维修工作不应该被认作是停电事故的原因。对于维修中输电系统的运行方式和与之相关的配电系统运营者的沟通是符合国家电网公司的计划标准和运行规程的。

(2) 输电系统的所有运行方式和倒闸操作均符合国家电网公司的计划标准和运行规程,恢复过程进行迅速、专业化,没有出现进一步的故障。调度工程师在重组网络、恢复发电与负荷之间平衡的过程中均保证了扰动仅限于受到影响的变电所。

(3) 故障出现的原因是在2001年更换老设备时安装了一个不正确的保护继电器。但尽管供应方和国家电网公司的相关员工遵循了质量控制和调试规程,但这个不正确的安装一直未被发现。在得知事故原因后,马上开始了对类似设备的全面检查,这个继电器目前已经被更换。到目前为止,国家电网公司输电系统中20%(9000件)的这一型号的设备已被检查,未发现类似情况。其余的设备将在4周之内完成检查。

(4) 参与自动化保护设备调试的工程师们经过适当的培训,具有相应的资质、经验和技能来执行任务。有证据表明,详细的调试程序在各个阶段都得到了正确的遵守,整个过程中没有被忽略的事项。然而在用于调试的文件中,自动保护设备的额定值如果能让调试工程师看得更清楚一些就好了。

(5) 切除Hurst变电所的变压器不是造成本次事件的直接原因。随后在Wimbledon至New Cross线路上增加的电流尽管在运行界限范围之内却启动了Wimbledon变电所的保护继电器。国家电网公司的工程师们无法预见他们切除设备的措施会造成停电事故。

(6) 停电事件给伦敦南部地区造成的影响由于中断了地铁和火车的运输服务而增大。

(7) 自7月20日,EDF能源公司配电系统的运行方式就使十分重要的伦敦地铁供电依赖于一条输电线路。这意味着在国家电网公司的Wimbledon变电所某一个变压器出现故障时,该配

(下转第12页 continued on page 12)

- 7(2) : 940-946 .
- [5] Lin S L , Van Ness J E . Parallel solution of sparse algebraic equations[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1994 , 9(2) : 743-749 .
- [6] Alvarado F L , Yu D C . Partitioned sparse A1 methods[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1990 , 5(2) : 452-459 .
- [7] Chan K W . Parallel algorithms for direct solution of large sparse power system matrix equations[J] . IEE Proceedings-C : Generation , Transmission and Distribution . 2001 , 148(6) : 615-622 .
- [8] 洪潮,沈俊明 (Hong Chao , Shen C M) . 电力系统暂态稳定计算的一种空间并行算法 (A parallel-in-space algorithm for power system transient stability simulation) [J] . 电网技术 (Power system technology) , 2000 , 24(5) : 20-24 .
- [9] Decker I C ,Falcao D M ,Kaszakurewicz E .Conjugate gradient methods for power system dynamic simulation on parallel computers[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1996 , 11(3) : 1218-1227 .
- [10] Graneli G P ,Montagna M ,La Scala M *et al* .Relaxation-Newton methods for transient stability analysis on a vector/parallel computer[J] . IEEE Transactions on Power System , 1994 , 9(2) : 637-643 .
- [11] La Scala M ,Sbrizzai R , Torelli F . A pipelined-in-time parallel algorithm for transient stability analysis (power systems) [J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1991 , 6(2) : 715-722 .
- [12] La Scala M , Bruccoli M A . Gauss-Jacobi-Block-Newton method for parallel transient stability analysis[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1990 , 5(4) : 1168-1177 .
- [13] 汪芳宗 (Wang Fangzong) .基于高度并行松弛牛顿方法的暂态稳定性实时分析计算的并行算法 (Parallel algorithm of high parallel relaxed Newton method for real-time simulation of transient stability) [J] . 中国电机工程学报 (Proceeding of the CSEE) , 1999 , 19(11) : 14-19 .
- [14] Felipe M , Rudnick H , Cipriano A . Electromechanical transients simulation on a multicomputer via the VDHN-Maclaurin method[J] . IEEE Transaction on Power Systems , 2001 , 16(3) : 418-426 .
- [15] 陈国良 . 并行计算——结构、算法、编程[M] . 北京: 高等教育出版社, 1999 .
- [16] IEEE . Parallel processing in power systems computation[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1992 , 7(2) : 629-638 .
- [17] Chai J S , Bose A . Bottlenecks in parallel algorithms for power system stability analysis[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1993 , 8(1) : 9-15 .

收稿日期: 2003-10-20.

作者简介:

李亚楼 (1974-), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统机电暂态稳定的研究和软件开发;

周孝信 (1940-), 男, 中国科学院院士, 从事电力系统分析的研究;

吴中习 (1941-), 女, 教授级高工, 主要从事电力系统分析软件的研究和开发。

(编辑 杨天和)

(上接第 5 页 continued from page 5)

电系统的运行方式将导致供电的中断。然而, 国家电网公司清楚地知道, EDF能源公司有能力做出意外事故安排, 在这种情况下立即恢复伦敦地铁的供电。

(8) 同在正常工作方式下一样, 在事件中中国国家电力控制中心与EDF能源公司之间保持着密切的联系和沟通, 双方的调度在事件处理中都很有效。

5 应吸取的教训

伦敦地区的停电事故是由一系列看似偶然的事件触发的, 但问题是长期存在的, 不是突然爆发的。一旦出现某种合适的情况, 潜在问题就有可能酿成不可挽回的大灾难。伦敦地区停电事件告诉我们在以下几个方面应吸取教训, 引以为戒:

(1) SCADA系统的信号捆绑应根据设备的重要程度确定, 对系统有决定意义的设备应单独传送。类似的捆绑信号在我们的系统中也是很常见的, 伦敦停电事故后知道, 瓦斯继电器的报警并不是变压器的问题, 也就是说, 设备的问题并不像当初想象的那么严重。可以说, 是报警的机制本身愚弄了运行人员。把不同等级的问题放在同一报警级别上是不合理的。在现代化的电网运行中, 特别是在无人值班运行方式日益普及的情况下, 对报警方法进行适当的检查是必要的。

(2) 继电保护的整定和调试必须从严、从严、

再从严。伦敦南部地区停电事故的直接原因是继电器的不正确动作, 教训是惨痛的。尽管事故的调查报告称“详细的调试程序在各个阶段都得到了正确的遵守, 整个过程没有忽略的事项”, 但是这个结论仍然是难以让人信服的。错误型号的继电器是可以查找出来的, 只有严格的管理和一丝不苟的工作才能保证继电保护在关键的时刻按照技术设计的要求实现预定的目标。不少大事故都与继电保护有关, 这是值得深思的。

(3) 不管系统如何强健, 在系统的检修安排中都必须留有充分的安全裕度。伦敦地区电网是相当强健的, 出现这样的大面积停电几乎是不可思议的。但故障的出现往往就是由一系列的意外触发。可以假设, 如果当时没有线路停电检修, 或者是有一条, 而不是有两条线路同时检修, 这样的事故是不会发生的。我国的电网总体上来说没有伦敦电网那样强健, 所以停电的安排应更加慎重。

参考文献

- [1] Investigation Report into the Loss of Supply Incident affecting parts of South London at 18:20 on Thursday, 28 August 2003, <http://195.92.33/uk/library/documents/pdfs/London28082003.pdf> .

收稿日期: 2002-09-28.

作者简介:

唐葆生 (1960-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事供电技术管理工作。

(编辑 宋书芳)