



·粒子束及加速器技术·

电网波动对上海光源运行的影响及分析*

焦广为, 田顺强, 张文志, 吴旭, 孙波, 金林, 赵申杰, 徐俊杰

(中国科学院上海高等研究院上海光源科学中心, 上海 201204)

摘要: 电网波动对上海光源加速器的正常运行有较大影响。针对该问题, 展开了系统的分析和研究工作。首先介绍了电网波动的成因以及电网波动对上海光源的影响情况。通过对具体事例进行分析, 优化了上海光源加速器受电网波动影响后的基本恢复流程。分析了各硬件系统在发生电网波动时的不同表现, 并依此探讨了如何优化此类故障的处理流程, 建立完善的机器恢复程序。针对外电网波动提出若干建议, 并提出了面对电网波动时需要采取的措施, 尽可能降低电网波动对如低温压缩机、超导高频腔等关键设备的影响。以期缩短实际故障时间, 加快机器恢复速度, 保障上海光源稳定运行。以近 10 年运行数据为基础, 研究发现电网波动对上海光源的影响存在若干重要阈值, 这些阈值对机器恢复具有指标性作用。对因电压暂降产生的二次故障进行分析讨论, 并提出若干建议。

关键词: 上海光源; 运行维护; 外电网波动; 电能质量; 电压暂降

中图分类号: TL507

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210553

Influence and analysis of power grid fluctuation on the operation of shanghai synchrotron radiation facility

Jiao Guangwei, Tian Shunqiang, Zhang Wenzhi, Wu Xu, Sun Bo, Jin Lin, Zhao Shenjie, Xu Junjie

(Shanghai Synchrotron Radiation Facility Science Centre, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

Abstract: The fluctuation of power grid has a great influence on the normal operation of Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) accelerator. The study first introduces the causes of power grid fluctuation and its impact on SSRF in order to solve this problem. Through the analysis of former cases, the basic recovery process of SSRF accelerator affected by power grid fluctuation is sorted out and optimized. This paper also analyzes the different performance of each hardware system in the face of the power grid fluctuation. In addition, it discusses how to optimize the processing flow and establish a perfect machine recovery program. Several suggestions and measures are put forward in response to the fluctuation of the external power grid, so as to minimize the impact of the power grid fluctuation on key equipment such as cryogenic compressor and superconducting radio-frequency cavity, shorten the actual failure time, speed up the machine recovery, and ensure the stable operation of SSRF. Based on the operation data in the past ten years, it is found that there are several important thresholds for the impact of power grid fluctuations on SSRF, and these thresholds have an indicator effect on machine recovery. The secondary faults that are caused by voltage sags are analyzed and discussed in this paper, and some guidance and suggestions are put forward.

Key words: Shanghai Synchrotron Radiation Facility, operation and maintenance, fluctuation of external power grid, power quality, voltage dip

上海光源(SSRF)是中国大陆第一台中能第三代同步辐射光源, 总体性能位居国际先进水平, 目前共有 15 条光束线 19 个实验站开放运行。上海光源自 2009 年 5 月 6 日正式对用户开放, 除去集中维护检修期, 每年向用户供电 4000~5000 h。上海光源是目前国内最重要的综合大科学基础研究平台之一, 从用户开放至今, 支持的用户研究已经在《Nature》、《Science》和《Cell》三大顶级国际学术期刊发表研究论文超过 120 篇^[1]。上海光源年平均开机率在 98% 左右, 外电网波动而导致的故障时间在全部故障时间中始终占有较大比例。与其他系统的硬件故障不

* 收稿日期: 2021-12-09; 修订日期: 2022-04-25

联系方式: 焦广为, jiaogw@sari.ac.cn。

通信作者: 田顺强, tiansq@sari.ac.cn。

同, 电网波动来自于外部电网的状态变化, 光源运维人员无法通过常规方法如日常巡检、定时更换配件或检修设备等规避, 电网波动出现时加速器和光束线站各系统只能被动承受。因此对外电网波动进行研究并尝试寻找减轻电网波动的影响, 对提高光源开机率、MBTF、MDT 等运行指标具有十分重要的作用。本文分析了电网波动的特点和对上海光源运行的总体影响, 并通过具体事例介绍运行人员处置电网波动情况, 然后对各硬件系统的影响进行分析, 接下来给出电网波动故障一般处置流程, 在此基础上建立电网波动故障分级表。

1 电网波动的成因

本文所指的电网波动主要指的是上海光源在运行过程中遇到的外电网电压暂降, 属于电能质量问题的一种。电能质量问题可以定义为: 导致用电设备故障或不能正常工作的电压、电流或频率的偏差, 其内容包括频率偏差、电压偏差、电压波动与闪变、三相不平衡、瞬时或暂态过电压、波形畸变(谐波)、电压暂降、中断、暂升以及供电连续性等。美国统计数据全球范围内每年因电能质量和电气环境问题引起的经济损失高达数百亿美元, 改善和提高电能质量具有十分重要的意义^[2]。国标 GB/T 30137-2013 中电压暂降定义为电力系统中某点工频电压方均根值突然降低到额定值的 90%~10%, 持续时间为 10 ms~1 min 的短时间电压波动现象。作为一台第三代同步辐射加速器, 上海光源的运行离不开电网供电, 电能质量直接关系到上海光源的运行是否良好。

电压暂降是电能质量问题中最常见也是带来最多损失的一种, 近年来随着经济和社会发展, 用电范围不断扩大, 电网不断扩容, 电能质量问题激增, 给国内的科研、半导体、化工、钢铁等行业造成的直接经济损失每年可达数十亿, 间接经济损失不可估量, 引起了全行业的广泛重视。电压暂降对用户敏感设备造成的损害极大, 大部分电力电子设备对动态电压质量扰动敏感, 严重的电压暂降影响范围较大, 可以波及较大区域的负荷正常运行, 给用户带来的经济损失极大^[3]。用户敏感设备对电压暂降有不同的敏感度, 表 1 为国网浦东供电分公司对辖区内敏感用户的调查, 封装测试仪和数控机床对电压暂降的敏感度较高, 而计算机和空调等设备敏感度较低^[4]。

电压暂降主要原因有: 产电入网、输电损耗和电涌、高压尖脉冲、暂态过电压、电压下陷、电线噪声、频率偏移。电网中的谐波也会造成电压畸变, 提高高次谐波, 甚至造成过电压影响电网网络和设备, 并使无功补偿装置、部分配电设备退出运行, 极端状态下可造成部分电网瓦解。用电单位配电系统短路(暂态过电压)对同一供电母线上其他用户的冲击也是可能原因^[4-6]。极端天气对电网同样具有重大影响, 洪水、地震、台风、严寒、火灾等可以直接破坏电网设备, 并导致部分地区电网负荷迅速增长, 电网波动的概率增加^[7-9]。另外, 雷击所引发的外电涌和高压尖脉冲也是造成电压暂降的一个主要原因。广东电网数据显示在雨雾天、晴天、阴天发生电压暂降问题的比例分别为 48%、41% 和 11%, 其中晴天发生的电压暂降事件中电压暂降幅值一般不超过 10%, 而阴雨天该事件中电压暂降幅值则大于 30%^[10]。以上海光源所在的上海市浦东新区为例, 电网电压波动主要来源于大型工业负荷如电弧焊接机、电弧炉等, 此类大型工业负荷会对供电网络产生不利影响, 产生电网波动。综上所述, 电网波动的成因十分复杂, 上海光源作为用电单位, 无法对电网施加影响, 更不能根据电网波动的成因进行规避, 增强被动承受能力(如减少设备对电网波动的敏感性、增加抗干扰性等)是目前情况下所能选择的最优解^[2]。

2 电网波动对上海光源运行的影响

电网波动是上海光源加速器各类故障中影响范围最广的一种, 会导致各硬件系统出现故障, 致使加速器掉束无法正常供光。易受电网波动影响的系统主要有电源、高频、束测、低温、线站等。2021 年 1 月 13 日 20 时, 公用设施监测到电网电压幅度连续波动, 最大到 50.83%, 导致上海光源储存环束流丢失, 表 2 为电网波动发生时刻张江区域部分电压监测仪监测数据。此次故障导致了超导高频 2 号腔故障, 直线、增强器、储存环大规模电源跳变, 辐射防护人身安全保护系统连锁, 束测多个 BPM 无法读取数据, 光束线站前端状态大规模报警, 直线聚焦线圈故障等。鉴于此次波动幅度为有史以来最大, 中控根据紧急处理预案, 通知所有硬件分系统值班人员立刻到达现场进

表 1 国网浦东供电分公司对辖区内敏感用户的调查

Table 1 Investigation of State Grid Pudong Power Supply Branch on sensitive users within its jurisdiction

equipment	equipment with stand voltage sag amplitude /%
package tester	97
programmable controller	80
air compressor	80
refrigerator	80
numerical control machine tools	90
air conditioner	80
computer	60

行故障处理工作,同时要求技术安全和公用设施人员至实验大厅内进行紧急处置,恢复供电和供水,检查安防系统,确保人员和设备安全。当晚 00:39 储存环束流注入至 220 mA,恢复供光。本次电网波动共计停束 4.77 h。

表 3 统计了电网波动中易受影响的设备,通过对历次电网波动故障的处置情况进行分析发现:磁铁电源所受影响最广,低温和高温系统的恢复时间最长,真空和辐射防护从未在电网波动中出现较大故障,但其重要性必须得到运行人员重视。线站所受影响有增大趋势,低温所受影响呈下降趋势。运行人员的经验积累和专业素养直接决定故障处置过程的走向,经验丰富、配合默契的团队在处置过程中能提前规避很多风险,并缩短恢复时间。

图 1 统计了 2015~2021 年运行年度内电网波动持续时间和电压之间的关系,橙色点代表引起丢束的电网波动,蓝色点代表未引起丢束的电网波动,结果显示外网电压低于 90% 时,一般会造成上海光源丢束,中断供光,且引起丢束主要与电压幅度相关,与持续时间无直接关系。

表 2 张江高科 5 英里范围内电压检测仪数据
Table 2 Data of voltage detector within 5 miles of Zhangjiang Hi-Tech

distance/m	voltage sag amplitude /%
~5	57.1
~5	79.2
~5	76.0
~5	57.7
~5	54.3
~5	63.0
~5	59.2
~5	61.4
~5	76.5
~5	74.1

表 3 各分系统主要易受影响设备

Table 3 Main vulnerable equipment of each sub-system

system	vulnerable devices
magnet power supply	all magnets for storage ring and booster, partial magnets of linac, low-energy transfer line, high-energy transfer line
cryogenics	compressor
radio frequency	burst disc, ion pump, some small components
beam instrumentation	FPGA system, transverse feedback system
beamline	monochromator and super-fast big area detector
general aided technology	water flow monitoring and air circuit-breaker
vacuum	vacuum gauge and power supply
radiation protection	PPS control system

上海光源采用 PQube(美国电力标准实验室电能质量检测仪)监测光源总体的供电情况(如图 2 所示),图 3 为上海光源采用的 400 A MegaDySC 电压补偿情况(低于额定电压 88% 即输出完美正弦波保护)。

3 电网波动对各硬件系统的影响

在电网波动过程中,加速器最易受到影响的是电源、高频、低温、束测、光束线站等系统。当外网电压低于 90% 时,加速器束流丢失,储存环电源 OFF 或 OFFLOCK,高频系统超导腔和发射机故障,低温系统主要表现为压缩机宕机,光束线站的部分设备损坏和信号连锁。电网波动造成加速器停机,线站无光可用,用户实验被迫中止,部分用户样品损坏,需另行制作样品并安排机时重新实验。电网波动对加速器的影响较大,恢复时间较长。

3.1 磁铁电源

从原理上分析,电网波动对交流电源的影响要高于直流源。上海光源除增强器 B、Q、S 铁以外,其他均为直流电源。但从历次电网波动故障中可以看出,交流电源反而较直流电源更不易受电网波动影响,造成这种现象的原因主要是上海光源加速器电源系统的设计理念决定。加速器储存环为追求稳定磁场必须采取直流电源,而增强器为回收能量为交流电源增加了大电容,大电容在电网波动一段时间内可持续为电源供电(小于 20 ms),且电网波动时机(波峰与波谷)对电容补充能力也有影响。储存环电源由于尺寸和安装设计的问题未增加电容,且相对于电

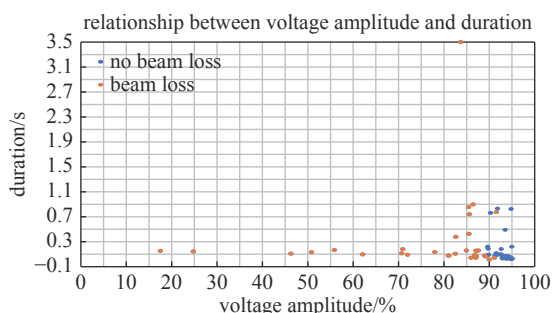


Fig. 1 Grid fluctuations in operation during 2015~2021

图 1 2015~2021 运行年度电网波动情况

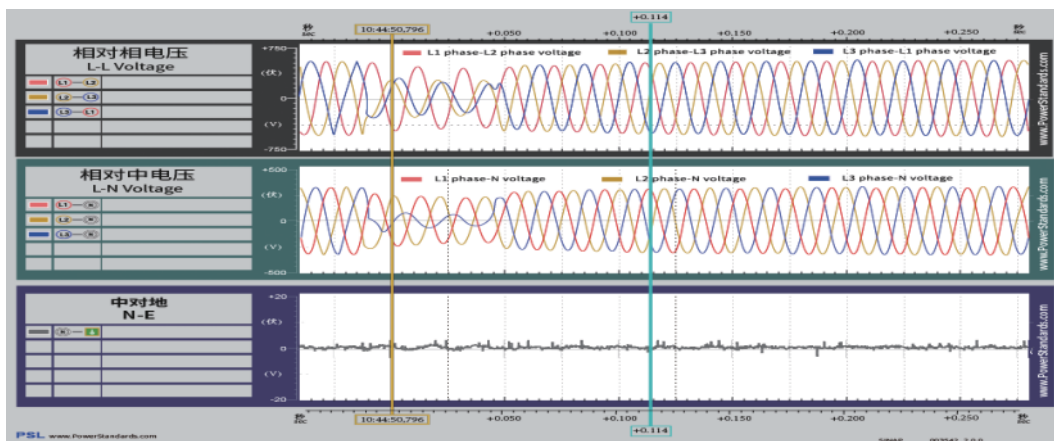


Fig. 2 Voltage transient waveforms recorded by PQube in waveform form

图 2 以波形形式记录的 PQube 电压暂降波形图

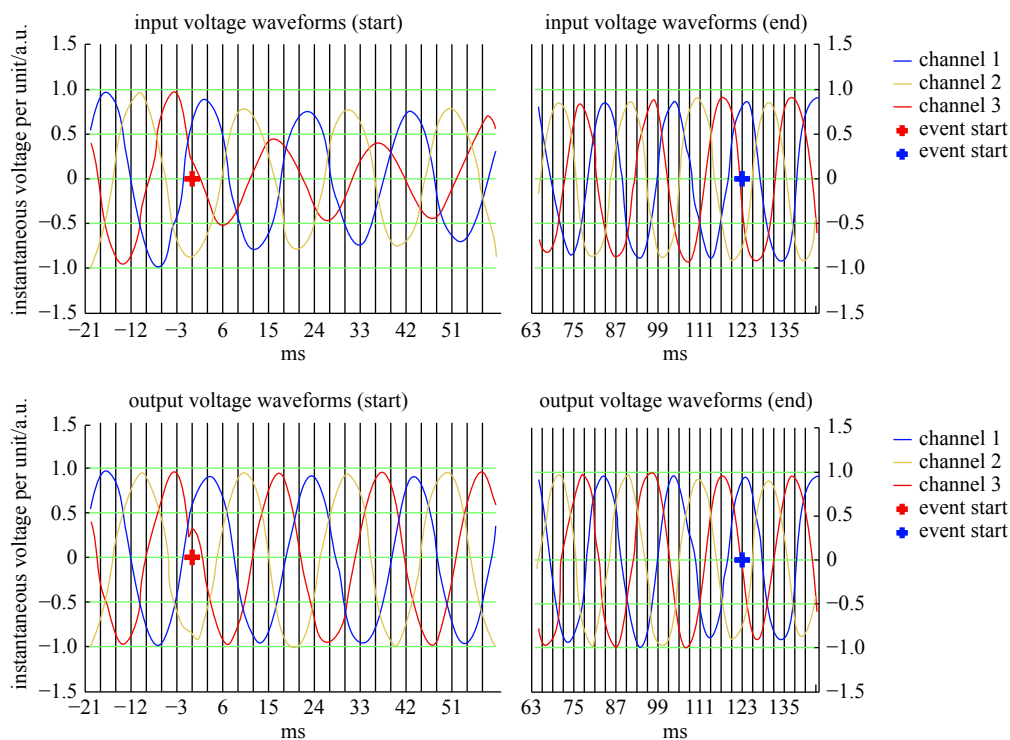


Fig. 3 MegaDySC voltage compensation case

图 3 MegaDySC 电压补偿情况

网波动对设备的影响, 保证加速器的性能指标更加值得设计者重视。电网波动对变频系统的影响主要是由于电压多次闪变引起保护动作。加速器系统变频设备均有快速补偿机制, 所以一般情况的电压波动不易对变频设备工作造成影响。电源系统由于其本身特点, 虽易受影响, 但标准化程度较高, 处理相对容易, 值得关注的是因受多次电网波动冲击和设备老化, 如主 B 铁和部分 Q 铁在遭遇较小幅度电压暂降时也有可能发生跳变进而丢束, 拉高 SSRF 电网波动停束的阈值。

3.2 低温

制冷机因为配备 UPS 电源, 因此在电网波动过程中较少受到影响。压缩机因其功率较大, 达到 250 kW, 其可接受电网电压波动范围为 (400 ± 40) V, 超过此范围则停机, 国内电网供电电压为 380 V, 本身已处于较低工作区间, 受到较大冲击后即会退出工作。为解决此问题, 公用设施部门曾于 2016、2017 年分别为低温系统安装了一台稳压电源, 这二台稳压电源分别采用逆变器升压和电容器蓄能与交叉耦合相结合的方式补偿, 可保证低温系统在电压波动 85% 以上, 持续时间低于 0.1 s 的范围内正常工作, 但遇较大波动时, 所起作用十分有限。低温系统压缩机是否停摆是决定故障恢复时间的一个重要因素。通常情况下, 若压缩机未停机, 则故障时间可以压缩到 3 h 内,

否则恢复时间会延长到 6~12 h 甚至更长。

3.3 高频

超导腔是整个加速器高频系统里最精密的设备,较其他设备更加脆弱、风险性更高。超导腔受影响主要包括两方面:(1)电网波动可能导致超导腔真空离子泵关闭,进而导致真空变差;(2)低温系统压缩机和制冷机宕机导致过压进而爆破膜损坏,遇较大波动时还需要补液,所需恢复时间较长,往往超过 12 h。发射机高压电源在电网波动时会因过流导致自我保护停止工作,需要人工干预恢复。电网波动时,高频系统部分信号受到干扰会启动正常保护机制,如连锁踢束、增强器高频保护等,此类故障较小,一般经人工干预后即可正常工作。另外,电网波动还可能损坏部分小型元器件如直流电源和传感器等,经值班人员更换后可恢复正常。超导高频腔由于其对低温系统的液氮的依赖性极强,所以一旦低温系统发生故障,超导高频腔即会受到影响,而且由于其设备本身的精密性,所需恢复时间较长,在电网波动造成的停机时间中占比极大,运行人员在发生电网波动时应第一时间关注高频液氮位变化,并于低温和高频值班人员取得联系,如液氮位下降应及时通报,力争将损失降到最低。高频系统在受到较大幅度电网波动冲击后,需要时间进行老练,以达到其最佳工作状态,而且为了安全起见,束流恢复后流强须由 200 mA 开始逐步升高至 260 mA,此过程往往持续 1~2 天,进一步增加了电网波动所带来的影响。

3.4 束测

电网波动对束测 BPM 测量装置 Libera 的 FPGA 系统影响较大,每次较为剧烈的波动都会导致 FPGA 系统运算的定时系统被重置。Libera 系统时间与控制网络系统时间无法同步,最终导致 Libera 无法正确在控制网络发布正确数据。对横向反馈处理器的影响,主要体现在系统设定参数写入到硬件中有可能被清空,此类情况累计发生过 2 次,均为电网剧烈波动时产生。电网波动对束测系统的影响还包括服务器死机,诊断线故障等。鉴于束测对束流的敏感性,运行组人员还需在恢复束流后联系束测人员检查横向反馈系统, BPM 是否有跳变等。

3.5 束线站

线站中最易受电网波动影响的主要为单色器和超快大型面探,此二种设备的恢复操作不对加速器本身的恢复产生影响,并且由于这些精密设备本身具有电路保护机制,受电网波动影响不大,较易受影响的是与其配套运行的冷水机组和真空泵。使用液氮循环机组进行冷却的单色器,遭遇电网波动后可能会产生回温,一旦回温发生,工作人员需要采用高压氮气吹扫和补充液氮降温等操作,时长 4~8 h,会影响用户供光。实验站数据收集目前普遍使用超快大型面探测器,附带的水冷机组和真空泵在电网波动时会停止工作甚至损坏,进而导致探测器内部真空破坏、温度和湿度超过阈值,此时需要更换水冷机组和真空泵组,检修设备模块,并进行抽真空、降温、降湿等操作,使设备恢复正常工作状态。电网波动可能会造成线站存储设备损坏,包括服务器与大型本地存储硬盘阵列等。电网波动会造成线站部分信号连锁,包括 PLC 错误信号和因真空降低导致部分安全光闸无法提起,影响加速器束流注入,运行人员在恢复机器状态时应对此进行关注。电网波动还可能会造成用户的实验样品报废等次生灾害。线站系统在电网波动中所受影响较加速器小,其恢复时间相对较短,运行人员在机器恢复过程中需对各插入件连锁界面进行检查,注意清除报警信号。

3.6 工艺

工艺系统运行过程中,流量监控对水冷设备保护具有重要意义,储存环技术走廊控制机柜中流量计表头实时显示的分支流量计数值同时参与 MPS 连锁。流量计表头由 24 V 供电,24 V 电源由环内配电柜 220 V 变压统一供电,电网波动幅值较大可能会对流量计表头供电造成短暂失真,引起误报警。电网波动还会对设备机柜内的空开产生影响,机柜内空开已使用约 5 年,由于老化的原因,电网波动导致空开跳闸没有到位,造成接触不良,危害设备的使用。

3.7 真空

电压波动幅度高于 80% 基本不会对真空系统造成影响,电压波动幅度低于 80% 会造成真空计无法开机、部分真空设备电源出故障,部分离子泵短时间(8 h 以内)停止工作的情况下不会对环真空造成影响,及时恢复电源和重新更换真空计,可保证真空系统正常工作。电网波动发生后,运行人员应及时通知真空值班人员,对全环真空进行监测,并注意真空阀门工作状态。

3.8 辐射防护

发生电网波动后,辐射防护值班人员会对安全连锁的控制系统和门禁进行检查,若发现因断电引起隧道门被打开,首先检查控制系统是否正常,若控制系统正常工作,需重新通风建连锁,否则的话需更换控制系统受损设

备。剂量连锁又名固定检测,发生电网波动后同样要进行检查,若工作异常,则需要采取如更换 IP 地址、检查 PLC、恢复电源、更换受损固定检测仪等操作。束损系统并不参与机器运行,但电网波动后可能会发生数据丢失的现象,需人工恢复。辐射防护系统由于关系到机器连锁和人身安全连锁,十分重要,固设计之初即考虑到其唯一性,所以辐射安全连锁只要能正常建立,即代表其工作正常,运行值班人员在准备恢复束流前应及时清除连锁界面报警信号并确认连锁是否已经建立。

4 上海光源应对外电网波动的措施

从一般管理学角度分析,并参考国内外其他大科学工程管理经验。加速器外电网波动故障发生后,应确立事件优先级,并以此为基础开展束流恢复工作。事件优先级应以人身安全、重点设备安全、束流恢复三级依次由高至低排列。外电网波动发生后,应首先确认现场工作人员的人身安全,贯彻以人为本的宗旨,视情况采取相应处置。在确认人身安全后,须对重点设备进行详细检查,防止二次故障的发生,对于有隐患的设备必须采取措施进行维修或者更换,绝不允许重点设备带病运行,重新开机前必须反复确认设备已达到安全运行的要求。束流恢复过程中,如遇异常需立即排查,必要时重新对加速器进行机器研究工作,当各项参数均已达到运行指标时,方可恢复供光。

一般处理流程:电网波动发生后,中控值班人员应第一时间与公用设施电站值班人员取得联系,确认电压波动幅度和持续时间,做出初步评估;接下来应观察储存环高频液氦位变化,与低温组值班人员取得联系,确认低温系统是否工作正常并通知高频值班人员,如低温压缩机、制冷机停机,应与高频人员协调,询问是否要求开隧道(开隧道需运行负责人同意),如需开隧道可提前通知防护组通风解连锁;初步检查完毕后,立即向运行负责人和运行组长汇报基本情况,通知各专业组进行处置;各组在处置情况过程中中控值班人员应主动保持联系,视情况作出相应安排;所有故障处理完毕后,需与各组确认所有系统已恢复正常或无可影响束流恢复的故障后,方可注束,注束前应检查 BPM OFFSET、各插入件界面、线站安全光闸状态、MPS 所有界面,并恢复近期全套工作参数;束流注入期间应观察轨道、注入速率和效率、束斑情况、高频功率及相位,遇到异常可先行尝试排除,无法解决后联系物理人员进行调试;束流注入完毕后,校正轨道,开快慢反馈,观察一段时间后若一切正常通知线站用光。

电网波动由于其自身特点,可能会导致二次故障。本文所指二次故障,为同步辐射光源界的次生灾害,二次故障的特性有后发性、隐蔽性及复杂性。二次故障究其原因往往由于遭遇强大外部环境变化而引起的全环工作状态改变,外部环境如供电供水等一旦遭遇变化,其所造成的影响具有涉及面广、影响程度深等特点。电网波动恢复过程中,各系统运行人员往往会因惯性而忽略某些平时不易遭受影响的设备或是仅进行巡检,且光源各设备间存在着大量逻辑关联,有牵一发而动全身的效果。此外,二次故障具有长期隐蔽性,不易为运行人员察觉,仅通过常规流程无法排查,电网波动会影响用电设备的可靠性,增加设备的故障率。上海光源长期运行中,部分设备的抗击打能力有所下降,设备发生故障的概率变大,因电网波动造成的停束阈值也逐渐升高。因此,电网波动后细致全面检查设备,并对敏感设备进行必要维护,可有效降低二次故障发生的几率。

目前 SSRF 应对电网波动故障的工作机制已较为成熟,但仍有需要细化的部分:建立完善的停电后机器恢复流程,除按规定通知各专业组排查问题外,还应针对易出现问题的设备进行重点检查,恢复供光前应由各分系统进行二次检查,中央控制室在所有分系统状态全部恢复正常后方可进行注束;机器状态的变化可能导致参数的改变,应定时对参数进行存储,并尽可能扩大存储范围。同时应探讨参数恢复的机制;重视人因工程,确保运行人员能得到全面的培训和重要的经验积累,新设备投入运行后应及时培训,告知故障处理流程和操作运行指南;对易受影响的设备应进行定期更换,维持设备可靠性。

通过以上对电网波动情况的分析,本文建立了一套电网波动故障分级标准(表 4),有助于运行人员更快地启动预案、减少反应时间、降低不必要的损耗、提高恢复速度,处理流程更加规范化、模块化。故障分级表主要包含 5 项:级数、束流影响、涉及范围、具体表征、处置方案。

5 结 论

本文对影响上海光源电网波动的成因和影响进行分析,填补国内外该方向研究空白。造成上海光源掉束的外网电压波动存在一个明显的阈值,即电压波动到低于 90% 的时候,加速器束流会丢失。随着设备的老化,以及不可预测的极端天气情况,该阈值有升高的趋势。总结各硬件设备受外网电压波动的影响分析结果,以及二次故障

表 4 电网波动故障分级表
Table 4 Grid fluctuation fault classification table

series No.	voltage fluctuation range	beam influence	involved	specific characterization	disposal plan
1	>90%	no effect	no	no	the accelerator operations group checks critical systems
2	85%-90%	duration of beam loss 0~3 h	RF, magnet power supply, beam instrumentation	RF trip, storage ring BQS magnet power failure, beam instrumentation server failure	involved in the professional group to deal with the fault, other professional groups to investigate
3	0-85%	duration of beam loss 3~24 h	RF, magnet power supply, beam instrumentation, beamline, cryogenic	RF trip, storage ring BQS magnet power failure, beam instrumentation server failure, cryogenic system failure	involved in the professional group to deal with the failure, other professional groups to investigate, the accelerator physics group to check the status of the machine, radiation protection group to open the tunnel

的分析讨论结果,对运行人员进行有效预判和处理具有重要意义。同时建立了一套电网波动常规恢复流程和电网波动故障分级表,对该类型故障进行细化分析,使运行人员在面对该情况时有更加充足的理论依据和经验积累。

致谢 本文在撰写过程中得到了上海光源运行组全体同仁和张耀、赵蓉芳、沈卫祖、张宁、汤启升、刘强等同事的大力支持,在此一并提出感谢!

参考文献:

- [1] 中国科学院. 上海光源国家重大科学工程[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(S1): 55-56. (Chinese Academy of Sciences. Shanghai Synchrotron Radiation Facility: a national major scientific project [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(S1): 55-56)
- [2] 王燕. 电能质量扰动检测的研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 174-186. (Wang Yan. Review of research development in power quality disturbance detection [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 174-186)
- [3] 王其林, 赵立辉. 汽车工厂电压暂降治理方法探讨[J]. 汽车工业研究, 2017(8): 51-56. (Wang Qilin, Zhao Lihui. Discussion on the management method of voltage sags in automotive plants [J]. Auto Industry Research, 2017(8): 51-56)
- [4] 冷伟岚, 顾皓. 电网波动对敏感用户的影响及控制措施[J]. 上海电力, 2004, 17(5): 447-449. (Leng Weilan, Gu Hao. Impact of power network pulsation upon sensitive consumers and its control measures [J]. Shanghai Electric Power, 2004, 17(5): 447-449)
- [5] 刘可龙. 电网电压波动对客户用电的影响与防范[J]. 通信电源技术, 2015, 32(4): 177-178. (Liu Kelong. Influence of grid voltage fluctuation in electricity customers and its preventive measures [J]. Telecom Power Technologies, 2015, 32(4): 177-178)
- [6] 刘晓峰. 电压波动对工厂电气设备的影响及解决方案[J]. 电世界, 2007, 48(5): 26-29. (Liu Xiaofeng. The influence of voltage fluctuations on factory electrical equipment and solutions [J]. Electrical World, 2007, 48(5): 26-29)
- [7] Perera A T D, Nik V M, Chen Deliang, et al. Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems [J]. Nature Energy, 2020, 5(2): 150-159.
- [8] Billinton R, Wu Chenjian. Predictive reliability assessment of distribution systems including extreme adverse weather [C]//Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2001. Toronto: IEEE, 2001: 719-724.
- [9] Mohamed M A, Chen Tao, Su Wencong, et al. Proactive resilience of power systems against natural disasters: a literature review [J]. IEEE Access, 2019, 7: 163778-163795.
- [10] 钟庆, 易杨, 武志刚, 等. 电力用户电压暂降问题分析与仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(6): 102-106, 115. (Zhong Qing, Yi Yang, Wu Zhigang, et al. Analysis and simulations of the voltage sags in power customer [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(6): 102-106, 115)