

继电保护

分布式发电系统保护控制研究(三): 系统调试方案设计及测试结果

贺 军¹, 罗华峰², 戚宣威², 杨 猛¹, 吴建洪¹, 嵇兴康³

(1. 杭州意能电力技术有限公司, 杭州 310012;

2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014;

3. 浙江浙能长兴发电有限公司, 浙江 长兴 313000)

摘要: 依据“由简至繁、循序渐进”的原则, 设计并开展了分布式发电系统保护控制的调试工作。分别进行了110 kV变电站、分布式电源、数据中心和站用电系统等分系统的单独调试, 并在此基础上, 分步开展了分系统之间的集成测试。最后, 通过实际切除外部市电, 以验证分布式电源的黑启动功能。结果表明, 在外部市电全失后, 分布式发电系统可在2 min 40 s内恢复数据中心的供电和制冷, 从而确保数据中心的稳定可靠运行。

关键词: 分布式发电; 网源荷; 黑启动; 数据中心; 系统测试

文章编号: 1007-1881(2018)11-0046-07

DOI: 10.19585/j.zjdl.201811008

中图分类号: TM61; TM712

文献标志码: B

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Protection and Control for the Distributed Generation System (III): System Commissioning Scheme and the Test Result

HE Jun¹, LUO Huafeng², QI Xuanwei², YANG Meng¹, WU Jianhong¹, JI Xing kang³

(1. E.Energy Technology Co., Ltd., Hangzhou 310012, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China;

3. Zhejiang Energy Changxing Power Generation Co., Ltd., Changxing Zhejiang 313000, China)

Abstract: This paper designs and carries out the protection and control system commissioning for the distributed power generation system based on the principle of "from simple to complex and step by step". The subsystems of the 110 kV substation, the distributed generation, the data center and the auxiliary power system are commissioned. Furthermore, the integration testing between the subsystems are carried out step by step. The outside power supply is cut off in practice for black start test. The results show that the distributed power generation system can recover power supply and the refrigeration for the data center within 2 minutes and 40 seconds, thereby insuring the stable and reliable operation for the data center.

Key words: distributed generation; grid-source-load; black start; data center; system commissioning

0 引言

分布式电源通过为 IDC(互联网数据中心)提供了高效、清洁、可靠的冷电负荷, 可产生巨大的社会、经济效益^[1-5]。分布式发电系统涉及电网、电源、负荷以及站内相关设备之间的协同配合, 其调试工作难度较大, 目前尚无成熟的经验

可循^[6-10]。

为实现分布式发电保护控制系统网-源-荷的协同配合与正确动作, 本文开展了系统调试方案研究: 简要论述了分布式发电系统的整体结构以及控制保护模式; 依据“由简至繁、循序渐进”的原则, 结合相关重点技术内容, 设计了各分系统和系统集成的调试方案; 现场开展实际外部市电

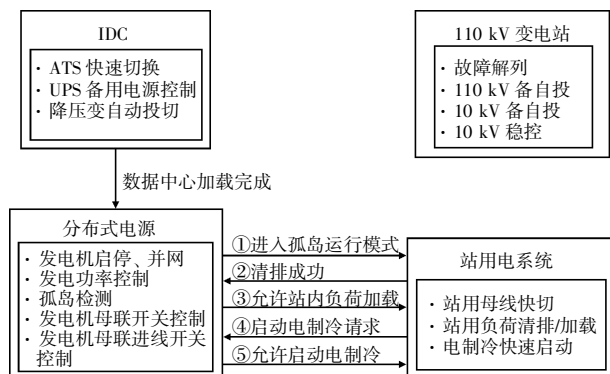
消失后的控制保护动作行为测试,结果表明在外部市电全失后,分布式发电系统可通过黑启动流程在 2 min 40 s 内恢复数据中心的供电和制冷。

1 分布式发电系统简介

1.1 整体系统结构

IDC 对制冷和供电系统的可靠性要求极高,在外部市电消失后需要在 5 min 之内恢复冷电供应。为实现上述技术指标,分布式发电系统涉及多个分系统的协同配合,主要包括:110 kV 变电站、分布式电源(包括柴油发电机和内燃机)、IDC(含 UPS 和站内电源切换装置)和站用电系统(含电制冷设备)等。

为确保各个分系统协同配合并考虑运行的可靠性,需在系统间采用电缆硬接线回路传输少量的逻辑信息,同时通过就地检测判据和相关时序配合完成复杂的控制流程。各分系统的主要功能配置和系统间的信息交互情况如图 1 所示。



注:ATS即先进燃气轮机系统;UPS即不间断供电系统;实线箭头为电缆硬接线传输的逻辑信号。

图1 分布式发电系统各分系统功能配置及交互信息

1.2 分布式电源控制系统架构模式

图 1 所示的各分系统中,分布式电源的控制系统是实现总体控制保护功能的主体与核心,该系统采用三级集中-分布控制模式,如图 2 所示。

位于监控室的上位系统实现发电机组的协同控制(包括黑启动功能)与监视,完成与站用电系统、IDC 等其他分系统之间的信息交互,并将通过 CAN 网络与各台机组的并机柜相联系。

在控制柜室内,按单台发电机分别配置了并机柜,以实现发电机的频率/电压控制和并机操作,并机柜内还配置了发电机单体保护的装置。

此外,还按间隔配置了发电机主机并机柜和发电机母分并机柜,以控制发电机母线进线断路器、母联断路器的同期合闸与分闸,同时主机并机柜还可以在获取控制权限的情况下,同期合闸 110 kV 主变压器(以下简称“主变”)低压侧断路器,以实现与外部系统并网。

位于发电机本体附近的就地控制柜负责执行上级并机柜下发的调频、调压等控制信息,并将发电机本体的转速等相关运行数据上传,同时可实现发电机本体的基础控制保护功能,如启停机、手动调压/调速等。

2 系统调试方案及结果

2.1 总体技术路线

由于分布式发电控制系统涉及各分系统之间的协同配合,故设计了“由简至繁、循序渐进”的分步调试方案,其总体的技术路线包括:

(1)完成发电机本体、10 kV 开关柜等一次设备调试,并确保与本体相关电压、电流、信号、控制等二次回路的正确性。

(2)完成 110 kV 变电站、分布式电源、IDC 及站用电系统等分布式发电相关分系统的调试。

(3)开展能源站内部黑启动试验,完成分布式电源与站用电系统之间的联调。

(4)实际操作 110 kV 变电站中的 110 kV 进线断路器,真实模拟 IDC 外部市电消失情况,以测试分布式发电系统的整体协同控制。

2.2 各分系统调试方案及结果

对于 2.1 部分所述的各分系统调试内容,110 kV 变电站中的控制保护功能和 IDC 的电源切换功能较为简单,目前已有成熟经验,文中不再赘述。以下将重点介绍分布式电源控制系统以及涵盖电制冷设备的站用电系统的调试方案及结果。

2.2.1 分布式电源控制系统调试

图 2 所示的分布式电源控制系统包含三级结构,各级控制的调试内容如表 1 所示。在调试过程中,重点工作是根据实际带负荷运行情况,整定发电机频率/电压控制模块的 PI 调节参数,该参数的设定需兼顾调节的响应速度和超调范围,特别是在多台机组同时运行期间,PI 参数若调节不当,将会在机组之间引发功率振荡。

为确保柴油发电机组带冷电负荷黑启动试验

表 1 分布式电源控制系统调试方案

控制层级	调试内容	
就地	就地单机启停机、紧急停运、手动调速/调压	
并机柜	发电机并机柜	单台发电机检同期/检无压合闸, 发电机单体保护功能
	主机并机柜	发电机组检同期并网
	母联并机柜	发电机母分开关检同期/检无压合闸及分闸
后台上位系统	发电机组功率均分和经济运行控制、柴油发电机快速启机和带电制冷负荷硬启动、运行模式切换试验	

的顺利进行, 在分布式电源调试期间提前开展了 11 台柴油发电机组快速启机以及带电制冷机硬启动试验。11 台柴油发电机组可以在 15 s 以内全部启动且并网至发电机母线; 2 台柴油发电机即可带额定功率为 800 kW 的电制冷设备硬启动(瞬时启动电流为额定电流的 4~5 倍)。上述调试结果表明, 柴油发电机组具有很快的启动速度和较强的带载能力, 可为快速恢复负荷供电制冷提

供有利条件。

此外, 在分布式电源控制系统调试期间, 采用在控制柜端子排上强制二次电压和开关位置等信号的方法, 以模拟一次系统的不同运行方式, 从而初步验证发电机黑启动顺控流程的正确性, 为后续实际黑启动测试的成功开展奠定基础。

2.2.2 站用电系统

站用电系统采用 Rockwell PLC 控制构建自动控制系统, 以实现站用变、电制冷、380 V 开关和工艺负荷(如电动机)的控制。

如图 2 所示, 站用电系统需要与分布式电源控制系统完成一定的信息交互, 并配合完成部分黑启动流程。站用电系统的调试首先采用强制二次信号、手动触发等方式单独验证站用电系统的清排、加载和启动电制冷功能, 以确保后续系统集成调试的顺利进行, 主要调试的站用系统功能及其目的包括: 在进入孤岛运行模式下清排站内负荷, 为柴油发电机组的空载启动创造条件; 在

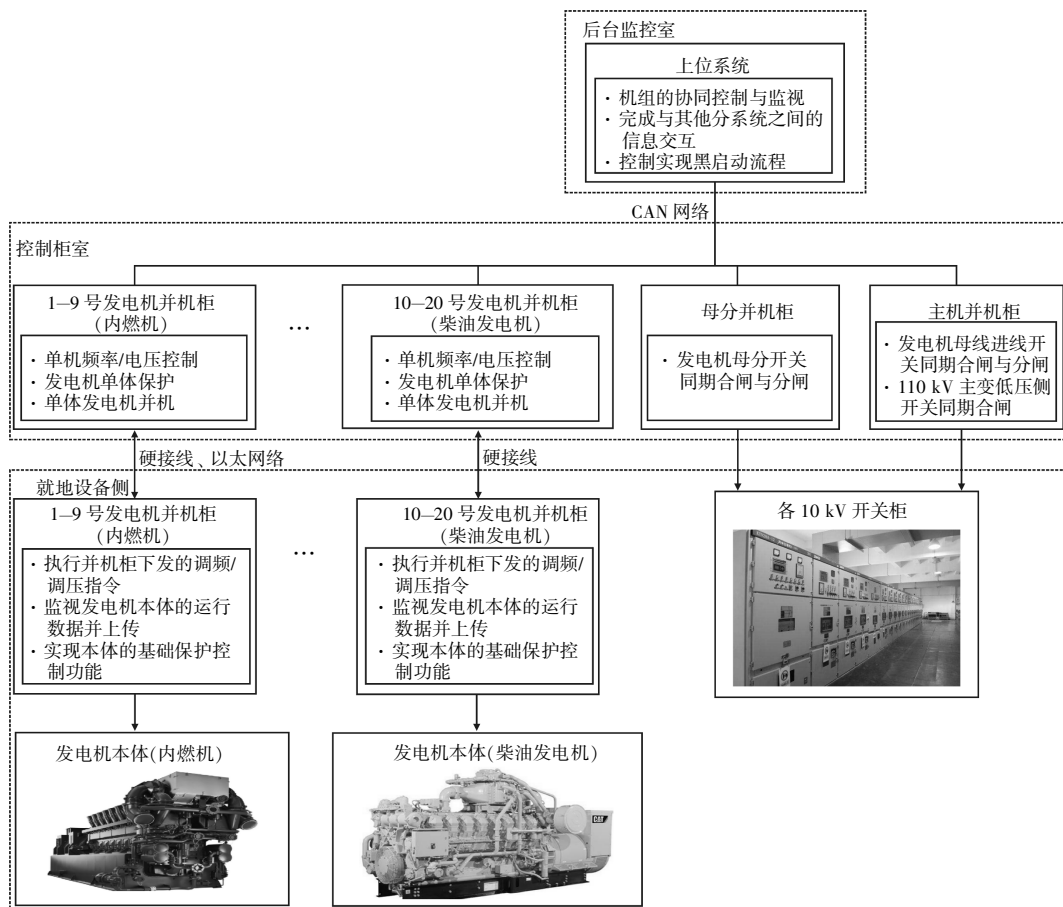


图 2 分布式电源控制系统架构

发电机母线恢复供电后，加载工艺负荷、启动电制冷设备，恢复 IDC 供冷。

在上述调试工作中，重点是站内电制冷设备的调试。电制冷设备具有快速启动功能，在供电中断后，若电压恢复，则可自动快速启动，以恢复制冷工作，该功能对于黑启动后恢复 IDC 的供冷极为重要。为此，结合实际运行情况，专门设计、开展了电制冷快速启动试验，内容包括：

(1)实际启动 10 kV 站用母线的事故快切功能，以模拟电制冷设备供电闪断情况。

(2)供电中断后，利用柴油发电机组带电制冷设备硬启动，模拟黑启动期间恢复制冷的工作流程。

结果表明，在供电中断后 64 s 内，电制冷设备可以快速重启以恢复正常制冷。其中，对于柴油发电机带电制冷硬启动，调试期间发现由于启动电流过大，导致发电机母线电压发生了明显波动。电制冷设备本体带有低压和过压保护功能，其定值需要躲过硬启动期间的电压波动，否则将造成电制冷跳机而导致快启失败。经试验，低电压和过电压保护的定值分别设定为 90% U_e 和 110% U_e (U_e 为额定电压)，动作延时均为 3 s。在该定值下，电制冷设备可以由柴油发电机组供电顺利快启。

2.3 系统集成调试方案及结果

在完成各分系统调试以及系统间信号联调的基础上，开展集成调试，包括站内黑启动试验和 IDC 失电试验。

2.3.1 站内黑启动试验

为确保全站失电试验的顺利开展，首先需进行站内黑启动试验。在正常运行情况下，拉开发电机母线进线的 10 kV 开关，模拟能源站内部设备失电，验证发电机控制系统和站用电系统之间的协同配合。

试验结果表明：在发电机母线进线断开后，发电机控制系统可在站内负荷清排后，快速启动柴油发电机组，并在柴油发电机容量满足后发送电制冷快速启动指令；电制冷设备在断电 64 s 后，恢复正常供冷。通过站内黑启动，可在外部站用电源失去情况下，利用柴油发电机和电制冷设备的快速启动功能，恢复站内负荷与 IDC 供冷。

2.3.2 IDC 失电试验

通过向电网申请，实际操作 110 kV 进线开关，真实模拟 IDC 外部电源消失情况，以测试整个分布式发电系统的整体协同控制。试验内容为：两回 110 kV 进线供电情况下的单回 110 kV 进线供电失去试验(包括 10 kV 系统备自投动作和不动作 2 种情况)、110 kV 进线供电全失情况下的黑启动试验。

(1)单回 110 kV 进线失电，变电站内 10 kV 备自投正确动作。

试验前系统的运行方式如图 3 所示，两回 110 kV 线路均处于运行情况，110 kV 变电站处于“两线带两变”的正常运行方式，110 kV 和 10 kV 的分段母线的母联开关均处于断开位置；10 kV 发电机母线通过主变受电带站内电制冷负荷，发电机母线的母分开关断开，内燃机和柴油发电机均未运行。

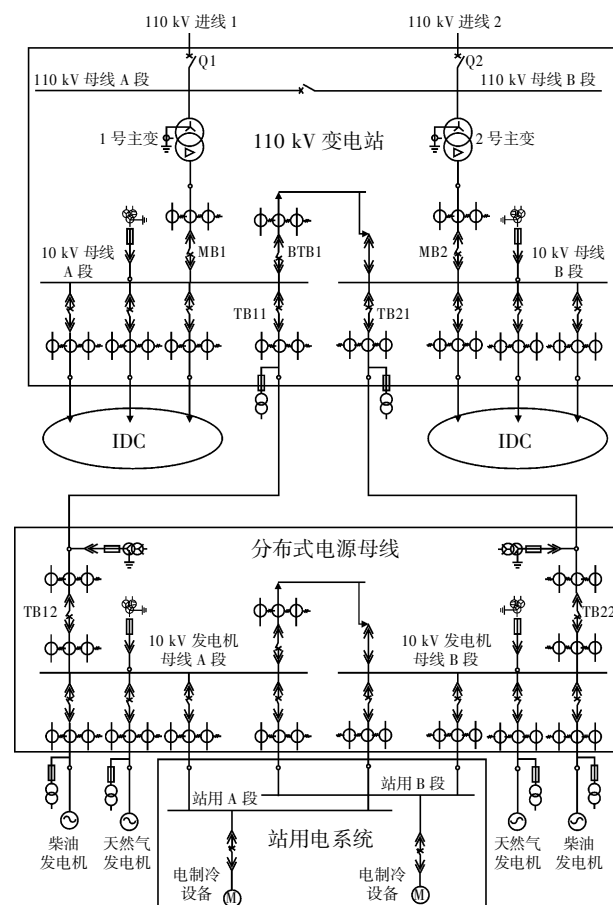


图 3 系统接线

试验时，手动跳开 1 回 110 kV 线路，110 kV 变电站内的 10 kV 备自投正确动作以恢复 IDC

供电。各分控制系统的动作行为如表 2 所示。通过分析可见, 在单回市电失去情况下, 若变电站系统备自投正确动作, 则可快速恢复 IDC 的冷电负荷。

表 2 各分系统的动作结果
(单回 110 kV 进线失电, 变电站内 10 kV 备自投正确动作)

时间/s	分系统	动作结果
0	110 kV 变电站	在“一线带两变”情况下, 运行的 110 kV 进线断路器 Q1 手动跳开(110 kV 备自投闭锁)
约 0	分布式电源	与跳开 110 kV 进线相对应的 10 kV 发电机分段母线失压, 检孤岛判据动作, 跳开失电母线对应的进线断路器 TB12
6.34	110 kV 变电站	10 kV 系统备自投动作, 变电站内失电主变的 10 kV 开关 MB1 跳开, 10 kV 母分开关 BTB1 合上, IDC 恢复供电
8.36	分布式电源	在 0 s 时跳开的开关 TB21 合闸, 与该开关对应的发电机母线恢复电压
约 64	站用电系统	电制冷设备快速启动成功, 恢复 IDC 制冷

注: 由于现场未安装故障录波设备, 各分系统的动作时间来自于发电机控制系统的估算值, 存在一定的误差, 表 3 和表 4 所记录的时间结果亦类似。

(2)单回 110 kV 进线失电, 变电站内 10 kV 备自投不动作。

试验前的运行方式与前文所述相同, 将 110 kV 变电站内的 10 kV 备自投由动作改为信号。

试验时, 手动跳开单回 110 kV 线路的进线开关 Q2, 此时变电站内的 10 kV 备自投由于改信号而不动作。发电机控制系统通过合上发电机母线的分段开关 BTB2, 实现负荷转供(如图 4 所示), 各分控制系统的动作行为如表 3 所示。通过分析可见, 在单回市电失去情况下, 发电机母线的母联开关 BTB2 可在备自投失败的情况下, 起到负荷转供的功能, 从而恢复 IDC 的冷电负荷。

(3)2 路 110 kV 线路均失电。

为模拟全站市电情况, 变电站 110 kV 系统采用“一线带两变”的运行方式, 如图 5 所示。在该系统运行方式下, 110 kV 的母分开关处于合位, 站内负荷由单回 110 kV 进线提供, 另一回进线的开关 Q2 处于断开状态。

试验时手动跳开 110 kV 进线开关 Q1, 变电

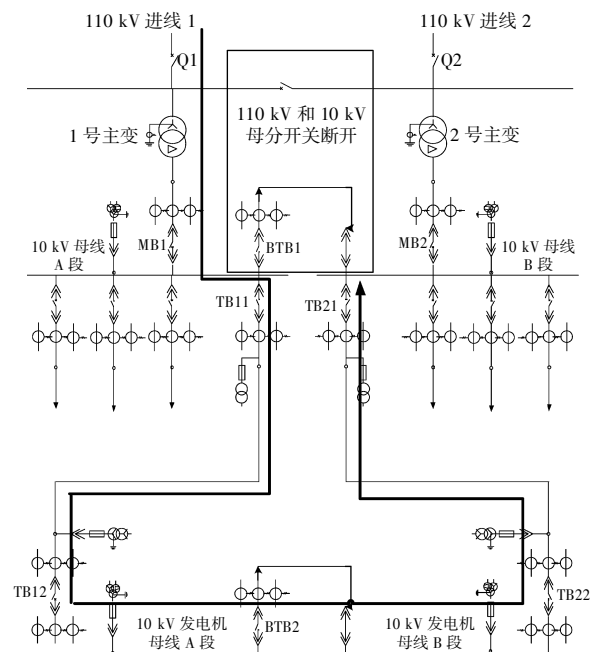


图 4 利用发电机母线 BTB2 实现负荷转供

表 3 各分系统的动作结果
(单回 110 kV 进线失电, 变电站内 10 kV 备自投不动作)

时间/s	分系统	动作结果
0	110 kV 变电站	单回 110 kV 进线开关 Q2 手动跳开(110 kV 备自投闭锁)
约 0	分布式电源	与跳开 110 kV 进线相对应的 10 kV 发电机分段母线失压, 检孤岛判据动作, 跳开失电母线对应的进线开关 TB22
6.87	110 kV 变电站	变电站 10 kV 系统稳控动作, 跳开失电变压器的低压侧 10 kV 开关 MB2
8.88	分布式电源	合闸之前跳开的发电机母线进线开关 TB22 和发电机母线分段开关 BTB2, 实现负荷转供
约 64	站用电系统	电制冷设备快速启动成功, 恢复数据中心制冷

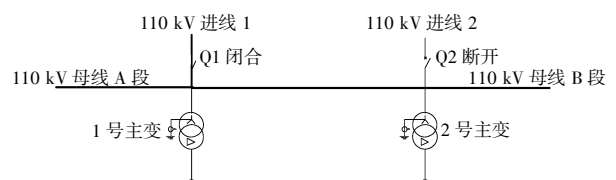


图 5 110 kV 系统“一线带两变”运行模式

站全站失电(记为 0 s)。分布式能源的控制系统在检测到变电站失电后, 开始控制进入黑启动程序, 其试验记录如表 4 所示。在失电 46.86 s 后,

所有柴油发电机组并至发电机母线；电制冷设备在 68.92 s 快速启动成功；IDC 的电负荷在 155.42 s 后恢复正常供应。

表 4 各分系统的动作结果(2路 110 kV 线路均失电)

时间/s	分系统	动作结果
		黑启动试验
0	110 kV 变电站	单回 110 kV 进线开关 Q1 手动跳开，全站失电
0.63	分布式电源	与跳开 110 kV 进线相对应的 10 kV 发电机分段母线失压，检孤岛判据动作，跳开失电母线对应的进线开关 TB12 和 TB22
1.81	分布式电源	分布式电源的控制系统向站用电系统发出“进入孤岛模式”信号，站用电系统开始清排
2.64	站用电系统	站用电系统清排结束后发出“清排成功”信号
3.83	分布式电源	分布式电源的控制系统开始启动所有的柴油发电机机组
6.66	110 kV 变电站	10 kV 系统稳控动作，跳开主变的 10 kV 低压侧的开关 MB1 和 MB2
15.90	分布式电源	第一台柴油发电机合闸至发电机母线，发电机母线电压开始恢复正常
20.75	分布式电源	分布式电源的控制系统向站用电系统发出“允许站内负荷加载”信号
22.76	站用电系统	站用电系统加载完站内负荷后，向分布式电源的控制系统发出“启动电制冷请求”信号
	分布式电源	分布式电源的控制系统接受该信号后向站用电系统返回“允许启动电制冷”信号
46.86	分布式电源	11 台柴油发电机全部并至发电机母线，柴油机组从接收到启动指令至全部并机共计用时约 43 s
68.92	站用电系统	2 号电制冷快速启动成功
68.92	分布式电源	分布式电源的控制系统同期合闸发电机母线的进线开关 TB12
74.92	分布式电源	分布式电源的控制系统同期合闸发电机母线的进线开关 TB22
155.42	数据中心	在变电站 10 kV 母线电压恢复后，IDC 负荷重新加载完毕，供电全部恢复正常
		柴油发电机带 IDC 负荷稳定运行 30 min 后市电恢复，柴油发电机组开展同步并网试验
0	分布式电源	外部市电恢复后，分布式电源发出检同期合主变 10 kV 低压侧开关 MB1 指令
13.56	分布式电源	MB1 同步合闸成功。柴油发电机组正确解列、开始冷却停机

柴油发电机组黑启动成功，在 IDC 负荷稳定运行 30 min 后，恢复 110 kV 电源。开展发电机组同期与外部电源的并网试验，试验结果表明，在发出并网指令 13.56 s 后，柴油发电机组可同步并网至外部市电，并随后正确解列，冷却停机。

试验结果表明，在外部市电全部失去后，通过各分系统之间的协同控制，可在 2 min 40 s 内恢复 IDC 的冷热负荷供应，该时间小于预期要求的 5 min。

3 问题与讨论

分布式发电系统控制涉及电源、电网、负荷以及站用电等多个系统之间的协同配合，其测试工作点多面广、难度较大。在现场开展联调测试工作的试验条件和试验时间均有限制，该工作仅能验证各分系统的基本控制策略，难以全面细致地验证逻辑细节。

对此，可考虑构建仿真测试环境来模拟分布式发电系统的一次电气设备，对控制保护系统，特别是针对核心的发电机控制系统开展仿真试验，以充分验证控制保护逻辑的有效性和正确性。

4 结语

本文论述了分布式发电保护控制系统的调试方案与测试结果。为实现分布式发电系统的网-源-荷协同配合，遵循“由简至繁、循序渐进”的原则，设计并开展了分布式发电系统保护控制的调试工作：分别开展 110 kV 变电站、分布式电源(包括柴油发电机和内燃机)、IDC(含 UPS 和站内电源切换装置)和站用电系统(含电制冷设备)等分系统的单独调试；在此基础上，分步开展分系统之间的集成测试；最后通过实际切除外部市电，开展黑启动测试。结果表明，在外部市电全失后，分布式发电系统可在 2 min 40 s 内恢复 IDC 的供电和制冷，从而确保 IDC 的稳定可靠运行。

参考文献：

- [1] 赵波,李鹏,童杭伟,等.从分布式发电到微网的研究综述[J].浙江电力,2010,29(3):1-5.
- [2] 唐锐.分布式电源对配电网继电保护的影响分析[J].浙江电力,2015,34(8):13-16.
- [3] 赵波.大量分布式光伏电源接入对配电网的影响研究[J].浙江电力,2010,29(6):5-8.

- [4] 张有兵, 穆森婕, 翁国庆. 分布式发电系统的孤岛检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 139-146.
- [5] 赵上林, 吴在军, 胡敏强, 等. 关于分布式发电保护与微网保护的思考[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 73-77.
- [6] 戴新生, 王剑波, 吕伟, 等. 分布式柴油发电机组测试系统[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(7): 1526-1527.
- [7] 宣晓华, 袁祎. 北仑发电厂 2 号机 PLC 调试体会[J]. 浙江电力, 1995, 14(5): 55-57.
- [8] 徐永邦, 邓霞, 邹新. 分布式光伏发电项目验收初探[J]. 建筑电气, 2014(11): 13-16.
- [9] 丁明, 包敏, 吴红斌, 等. 复合能源分布式发电系统的机

组组合问题[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 46-50.

- [10] 袁超, 吴刚, 曾祥君, 等. 分布式发电系统继电保护技术[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 99-105.

收稿日期: 2018-07-06

作者简介: 贺 军(1983), 男, 工程师, 从事电力系统保护与控制的研究工作。

(本文编辑: 方明霞)