

内 容 简 介

本书介绍了柴油发电机组的分类、组成和工作原理,分析了柴油发电机组的功率标定和技术指标,重点讨论了不同性质负载对柴油发电机组带载能力的影响,详细介绍了柴油发电机组供电方案的电源架构和运行方式以及柴油发电机组的运维保养方法。此外,还介绍了机房安装的柴油发电机组和集装箱式柴油发电机组的设计、安装的相关知识。

本书力求理论性和实践性相结合,书中所列的柴油发电机系统的供电方案及运维保养方法对当前主流的数据中心柴油发电机系统普遍适用。本书是数据中心柴油发电机系统运维工作流程的指导性教材,相信阅读本书一定会对数据中心柴油发电机系统运维管理从业人员大有裨益。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

数据中心柴油发电机系统运维 / 高善勃, 糕思齐, 王俊阳主编. —北京: 清华大学出版社, 2023.9
(新基建·数据中心系列丛书)
ISBN 978-7-302-64470-5

I. ①数… II. ①高…②糕…③王… III. ①数据处理中心—柴油机—电力系统运行②数据处理中心—柴油机—供电系统—维修 IV. ①TP308

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 154671 号

责任编辑: 杨如林

封面设计: 杨玉兰

版式设计: 方加青

责任校对: 胡伟民

责任印制:

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-83470000 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:

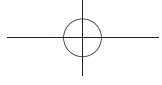
经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm 印 张: 15.75 字 数: 368 千字

版 次: 2023 年 10 月第 1 版 印 次: 2023 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 59.00 元

产品编号: 096118-01



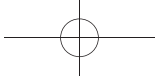
前言

自“十三五”规划明确提出实施国家大数据战略以来，大数据产业已成为我国数字经济发展的关键引擎。数据中心是新基建的重要“数字底座”，是助推数字经济发展的关键力量。在国家战略的指引下，推进数据中心产业高质量发展是全行业在“十四五”时期的关键任务。在全国数据中心建设数量快速增长的背景下，数据中心基础设施运维管理人才短缺的问题日趋严重，已成为制约行业发展的关键因素。为提升数据中心基础设施运维从业人员的整体技能水平，指导有关企业、教育机构培训的有效实施，由中国智慧工程研究会大数据教育专业委员会牵头，北京慧芃科技有限公司组织编写了“新基建·数据中心系列丛书”。

数据中心对系统连续、稳定、安全运行有着极高的要求，确保数据中心连续运行有两个最基本的条件，即供电不中断和连续制冷。数据中心要确保连续不间断供电，须配置独立的后备电源，而柴油发电机组则是当前数据中心备用电源的首选。在市电中断后，UPS（不间断电源系统）可短时间支撑服务器等核心设备的用电需求，整个数据中心的后续供电主要靠柴油发电机组来提供，因此数据中心的柴油发电机组是关键项目中关键负载的关键节点设备。保证柴油发电机组的成功启动和可靠运行对柴油发电系统的运维保养提出了更高的要求。

本书介绍了柴油发电机组的分类、组成和工作原理，以及柴油发电机组的功率标定、技术指标和不同性质负载对柴油发电机组带载能力的影响，重点介绍了数据中心柴油发电机组的供电方案以及维护保养方法。此外，还介绍了机房安装的柴油发电机组和集装箱式柴油发电机组的设计、安装的相关知识。本书作者长期从事数据中心柴油发电系统的规划、设计及运维工作，书中内容是作者多年实践经验的总结。本书力求做到理论性和实践性相结合，书中所列的柴油发电系统的供电方案及维护保养方法对当前主流的数据中心柴油发电系统普遍适用。本书是数据中心柴油发电系统运维工作流程的指导性教材，相信阅读本书一定会对数据中心柴油发电系统运维管理从业人员大有裨益。

本书与《数据中心 UPS 系统运维》《数据中心低压供配电系统运维》《数据中心高压供配电系统运维》等教材在内容上互为理论支撑，共同构成数据中心供配电系统运维管理的理论与实践的知识体系。本书注重对读者实际工作能力的培养，理论叙述以够



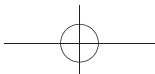
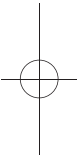
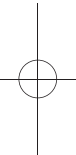
用为度，很多知识点的论述并没有详细展开，读者可以自行对感兴趣的内容进行更深入的阅读和学习。

在本书的编写过程中，参考了许多相关书籍和文献资料，在此向所有参考文献的原作者致以诚挚的谢意！在书稿内容及格式方面，得到了王其英老师、郑学美高工和同事叶社文、兰凡璧的指导和帮助，同事杨少林在书中插图的绘制方面提供了大量帮助，清华大学出版社的编辑老师在书稿统校及时间把控上给予了指导和帮助，在此对他们一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，诚望广大读者批评指正！

作者

2023 年 2 月

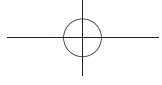


教学建议

章号	学习要点	教学要求	参考课时（不包括实验和机动学时）
1	- 什么是数据中心 - 数据中心的分级 - 数据中心的负荷等级 - 数据中心的负载特点 - 数据中心相关规范和标准 - 数据中心备用发电机组的运行特点	- 重点掌握数据中心的定义以及国内和国际上关于数据中心分级的三种标准 - 了解数据中心的负荷等级及其特点 - 了解数据中心备用电源需求特点 - 谐波的定义、危害和抑制措施，此内容属于难点，做一般性了解即可	1
2	- 柴油发电机组的特点 - 柴油发电机系统在数据中心的定位 - 柴油发电机组的分类和性能等级 - 自动化发电机组的等级标准 - 国标对机组功率的标定 - 柴油发电机组的技术指标	- 了解柴油发电机组的定义、特点、分类和品牌 - 掌握柴油发电机系统在数据中心的定位 - 了解柴油发电机组的等级划分 - 了解柴油发电机组的相关技术指标 - 柴油发电机组的功率标定，此内容既是重点也是难点，需理解并掌握	4
3	- 发动机（柴油机）的组成和工作原理 - 发电机的组成及工作原理 - 控制系统（控制器）的功能及品牌 - 柴油发电机组的辅助配置	- 掌握柴油发电机组的结构和工作原理，发动机（柴油机）和发电机的组成和工作原理是重点，也是难点，需理解并掌握 - 励磁系统是难点，要求做一般性了解 - 熟悉控制系统（控制器）的功能	6
4	- 数据中心柴油发电机组的选配（包括功率等级选择、机组容量选择及影响因素） - 柴油发电机组的运行方式（包括单机运行和并联运行） - 柴油发电机电源系统的可靠性设计	- 了解如何选配数据中心柴油发电机组 - 了解柴油发电机组的运行方式 - 了解柴油发电机电源系统的可靠性设计方案 - 了解柴发电源与市电的切换方式 10kV 配电系统的电源架构和运行方式，以及低压 0.4kV 配电系统的电源架构和运行方式，此内容是重点也是难点，要求理解并掌握	8

续表

章号	学习要点	教学要求	参考课时（不包括实验和机动学时）
4	- 柴发电源与市电的切换方式 - 典型的 10kV 配电系统的电源架构 - 低压 0.4kV 配电系统的电源架构 - 数据中心柴油发电机电源系统的监测和控制 - 某大型数据中心柴发电源系统示例	- 数据中心柴油发电机电源系统的监测和控制，此内容是难点，做一般性了解即可 - 掌握柴油发电机组并机的逻辑控制方式 - 能够根据图纸分析理解 10kV 供配电系统运行方案	8
5	- 柴油发电机系统的机房设计方案 - 室内外供储油系统的设计方案 - 集装箱式柴油发电机组的特点 - 集装箱式柴油发电机组的设计方案	- 了解柴油发电机系统的机房设计方案 - 了解室内外供储油系统的设计方案 - 了解集装箱式柴油发电机组的特点 - 了解集装箱式柴油发电机组的设计方案	4
6	- 机房安装的柴油发电机组的安装（包括机组安装前的准备工作，机组本体的安装，供油系统、排烟系统、通风系统、冷却系统的安装，电缆敷设和连接） - 集装箱式柴油发电机组的安装 - 柴油发电机组的目视检查 - 柴油发电机组的检测	- 了解机房安装的柴油发电机组的安装方法 - 了解集装箱式柴油发电机组的安装方法 - 柴油发电机组的目视检查方法，此内容是重点，需要理解并掌握 - 柴油发电机组的检测，此内容既是重点也是难点，需要重点掌握	4
7	- 柴油发电机组运行的一般要求 - 柴油发电机组标准化操作程序 - 柴油发电机组故障应急预案 - 柴油发电机组周期性维护保养内容 - 柴油发电机系统的清洁 - 某数据中心柴油发电机组维护保养示例 - 备用电源系统的定期测试 - 柴油发电机组运行异常的故障判断	- 了解柴油发电机组运行的一般要求 - 了解并掌握柴油发电机组周期性保养和维护方法 - 柴油发电机组每天的例行检查内容，此内容是重点，需要重点掌握 - 了解备用电源系统的定期测试方法 - 发电机组运行异常的故障判断，此内容是重点也是难点，需要学会判断方法 - 柴油发电机组 SOP、MOP 和 EOP 文件的编写，此内容是重点也是难点，需要了解并掌握 - 柴油发电机组维护保养过程中的安全注意事项，此内容是重点，需要认真掌握	6



目 录

第 1 章	数据中心概述	1
1.1	什么是数据中心	1
1.2	数据中心的分级	1
1.2.1	根据 GB 50174—2017 分级	2
1.2.2	根据 Uptime Tier 等级认证分级	2
1.2.3	根据 TIA-942 分级	3
1.3	数据中心负载及其特点	3
1.3.1	数据中心的负荷等级	3
1.3.2	数据中心的负载特点	4
1.4	数据中心备用电源需求特点	7
1.4.1	数据中心相关规范和标准	7
1.4.2	数据中心备用发电机组的运行特点	8
	习题	8
第 2 章	柴油发电机组概述	9
2.1	柴油发电机组的定义和特点	9
2.1.1	柴油发电机组的特点	9
2.1.2	现代发电机组的基本特点	11
2.2	后备发电机系统在数据中心的定位	11
2.3	数据中心追求的发电机组的特性	12
2.4	柴油发电机组的分类	13
2.5	柴油发电机组的等级划分	15
2.5.1	发电机组的性能等级	16
2.5.2	自动化发电机组的等级标准	16
2.6	目前发电机组的相关标准	18
2.7	柴油发电机组的功率标定	19
2.7.1	国标对机组功率的标定	19

2.7.2	柴油发电机组的功率修正	21
2.7.3	制造商对机组功率的标定	23
2.7.4	正确理解各种功率标定的意义	24
2.8	柴油发电机组的技术指标	25
2.9	柴油发电机组的型号含义和品牌	29
	习题	29
第 3 章	柴油发电机组的结构和工作原理	30
3.1	发动机	31
3.1.1	发动机的分类	33
3.1.2	发动机的系统组成	34
3.1.3	四冲程柴油机的工作原理	36
3.1.4	发动机的发展前景	38
3.2	发电机	39
3.2.1	发电机的组成	39
3.2.2	发电机的工作原理	46
3.3	控制器	54
3.4	柴油发电机组的辅助配置	55
3.4.1	数据中心备用柴油发电机组的辅助配置	55
3.4.2	数据中心柴油发电机组辅助设施的启动与退出	57
	习题	59
第 4 章	数据中心的柴油发电机电源系统	61
4.1	数据中心柴油发电机组的选配	61
4.1.1	选型前的注意事项	61
4.1.2	柴油发电机组的功率等级选择	61
4.1.3	柴油发电机组的容量选择	62
4.1.4	影响柴油发电机组选型的其他因素	68
4.2	柴油发电机组运行方式	69
4.2.1	单台独立运行	69
4.2.2	多台并机运行	70
4.3	发电和配电	82
4.3.1	柴发电源系统的可靠性设计	83
4.3.2	柴发电源与市电的切换	86
4.3.3	不同电压等级的电源架构	90
4.3.4	柴油发电机并机母线之间母联的设置分析	97
4.4	数据中心柴发电源系统的监测和控制	99
4.4.1	监控需求	99

4.4.2	柴发电源系统的常规监控	100
4.4.3	柴发电源系统的电源切换监控	101
4.4.4	柴发电源系统的自动加载与减载	103
4.4.5	柴发电源系统的自动增 / 减机组	106
4.4.6	柴发电源系统的远程监控	107
4.4.7	发电机组的保护	108
4.5	某大型数据中心柴发电源系统示例	109
4.5.1	供电原则	110
4.5.2	运行控制逻辑	110
4.5.3	10kV 供配电系统运行方案分析	112
	习题	118
第 5 章	柴油发电机系统的设计	120
5.1	柴油发电机系统的机房设计	120
5.1.1	机房的选址	121
5.1.2	机房布局	121
5.1.3	冷却系统	125
5.1.4	通风系统	128
5.1.5	机房的降噪与保温	133
5.1.6	排烟系统及尾气处理	135
5.1.7	燃油供给系统	136
5.1.8	机房消防	145
5.1.9	辅助电源设计	146
5.2	集装箱式柴油发电机组的设计	148
5.2.1	集装箱式柴发机组的布局	149
5.2.2	通风降噪系统	155
5.2.3	排烟系统	158
5.2.4	燃油系统	159
5.2.5	消防设施	164
5.2.6	箱内电气系统	165
5.2.7	系统防雷接地	168
5.2.8	控制系统	168
	习题	170
第 6 章	柴油发电机组的安装、调试及测试验收	173
6.1	柴油发电机组的安装	173
6.1.1	机房安装的柴油发电机组的安装	174
6.1.2	集装箱式柴油发电机组的安装	184

6.2 柴油发电机组的测试验收	187
6.2.1 柴发机组目视检查	188
6.2.2 柴发机组的检测	192
习题	204
第 7 章 柴油发电机组的运行和维护保养	207
7.1 柴油发电机组的运行	207
7.1.1 运行的一般要求	207
7.1.2 柴油发电机组标准化操作程序	208
7.1.3 柴油发电机组故障应急预案	216
7.2 柴油发电机组的维护保养	223
7.2.1 周期性维护保养内容	224
7.2.2 柴油发电机系统的清洁	229
7.2.3 某数据中心柴油发电机组维护保养示例	229
7.2.4 柴油发电机电源系统的定期测试	236
7.2.5 柴发常见故障处理	237
7.2.6 维护保养时的安全注意事项	239
习题	240
参考文献	242

1. 数据中心最基本的柴发电源系统的配电设计

图 4-7 所示为数据中心最基本的柴发电源系统，适用于数据中心规模不大或数据中心的设备可靠性非常高，且市电的停电概率很低而只须考虑市电短时停电期间启用柴发电源供电的情况。该电源系统的设计特点是，发电机组容量只按实际负载大小配置，不考虑任何冗余，每一个负载只考虑一条配电支路。其优点是系统简单，投资少；缺点是当市电停电启用柴油发电机组供电时，如果任何一台发电机组或并联断路器柜要进行计划性检修或发生故障，都将使柴发电源系统因过载而导致电压频率大幅度下降。如果不配置低频减载功能，则会造成柴发电源系统崩溃；如果配置了低频减载功能，则优先级较低的负载被迫停电。而当柴发电源系统供电时，如果负载的馈线断路器柜或 ATS 设备计划性检修或发生故障，则会造成相关负载非正常停电。

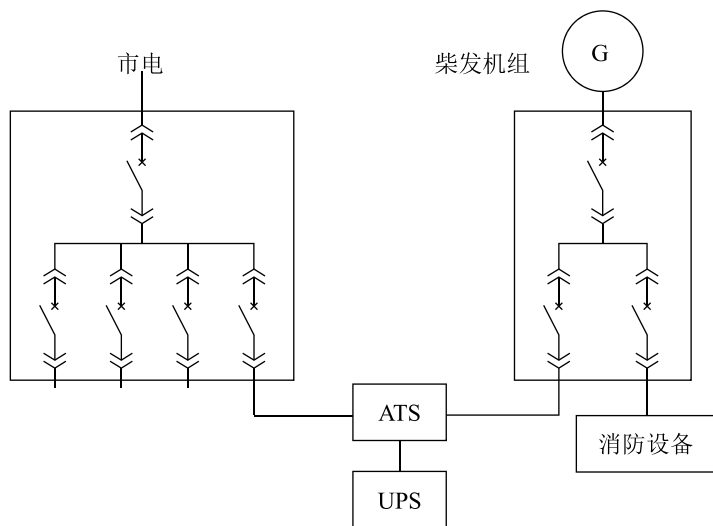


图 4-7 数据中心最基本的柴发电源系统

如果 ATS 计划性检修时数据中心的负载不允许停电，则需选用带旁路的 ATS，此时可将相关负载切换到 ATS 的旁路。同样，如果要求在发电机组进行计划性检修或发生故障时不中断对负载的供电，需要对柴发机组配置相同容量的冗余机组。

2. 数据中心“容性计划检修”型柴发电源系统的配电设计

在最基本的柴发电源系统方案中，作为终端负载的 IT 设备只有唯一的供电支路，在市电供电或柴发电源系统供电时，该配电支路中任一设备（例如 ATS 市电侧或柴发电源侧的上游馈线断路器）计划性检修或发生故障，都会中断 IT 负载设备的供电。

为了在供电设备进行计划性检修或发生故障时终端负载始终保持不中断供电，可采用如图 4-8 所示的供电方案。在该方案中，市电采用“一用一备”的方式，并配备柴发电源系统。

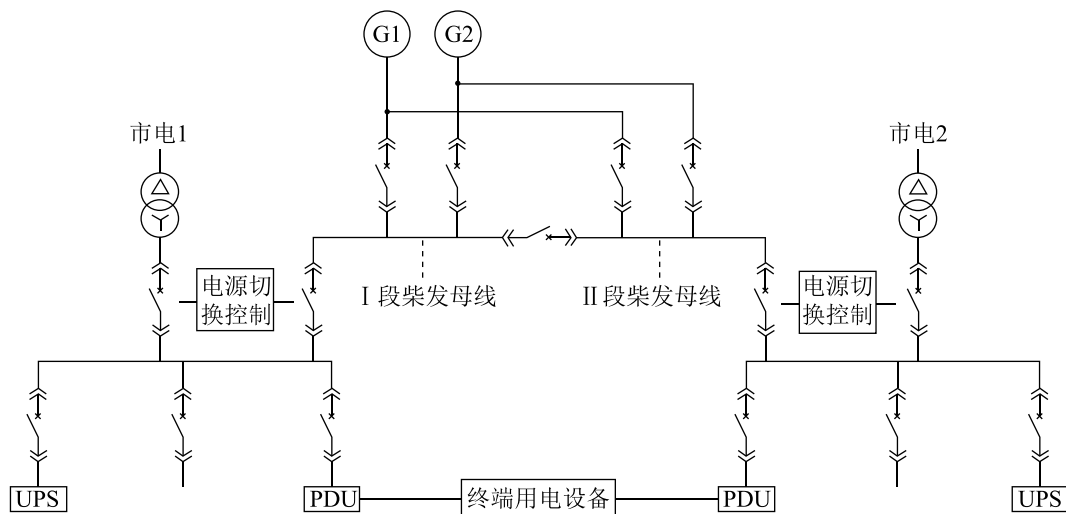


图 4-8 数据中心“容性计划检修”型柴发电源系统

该方案的工作过程如下：

(1) 正常运行状态下，市电 1 及其配电支路给所有负载供电，市电 2 及其配电支路处于备用状态。

(2) 当市电 1 及其配电支路 1 中的设备需要计划性检修或发生故障时，将所有负载切换到市电 2 及其配电支路 2 供电，此时柴发电源系统给市电 2 做备用。在两路电源切换过程中，可由 UPS 保持负载供电不中断。

(3) 此时，如果市电 2 又停电，则柴发电机组自动启动并将电源送到 II 段柴发母线，通过“电源切换控制”开关将柴发电源送到市电 2 配电母线，然后通过配电支路 2 给终端负载供电。

(4) 当市电 1 及其配电支路 1 中的设备计划性检修完毕或故障修复时，如市电 2 正常供电，则退出市电 2 及其配电支路 2；如柴发电源供电，则退出柴发电源，并由柴发电源作为市电 1 的备用电源。

在该方案中，柴发电源的设计特点是，机组装机容量按实际负载容量配置，并根据需要做有限冗余设计，所以任何柴发电机组正常检修均不影响柴发电源系统足够的备用容量；其次，每台柴发电机组设两条并联支路，分别并联到两段备用母线，两段母线通过两个备用主断路器分别送到两段系统配电母线。两段备用母线通过母联断路器连接，正常运行情况下该母联处于断开状态，因此，柴发电源配电系统中任何并联断路器、主断路器以及任一段备用母线的计划性检修，都不影响柴发电源送电到终端负载。由此可见，上述设计能确保柴发电源系统在任何设备计划性检修时，不影响该系统的正常备用作用。

3. 数据中心“容错”型柴发电源系统的配电设计

图 4-8 的方案（配一台冗余机组）中，由柴发电源系统供电时，若两台以上机组同

时故障，将导致部分终端负载不得不停电。如果数据中心所有终端负载都不能容忍任何形式的设备或线路故障停电，则应在图 4-8 的基础上对柴发电源系统做相应的改进设计。

如图 4-9 所示是“容错”型柴发电源系统的配电设计，该设计的特点是，系统采用双活供电链路，油机、不间断电源、制冷设备均采用 $2N$ 冗余配置。双活链路内，所有设备和配电路由完全物理隔离。任何一条链路的任何部件故障，不影响另一条链路的正常运行，不影响末端业务设备的运行。

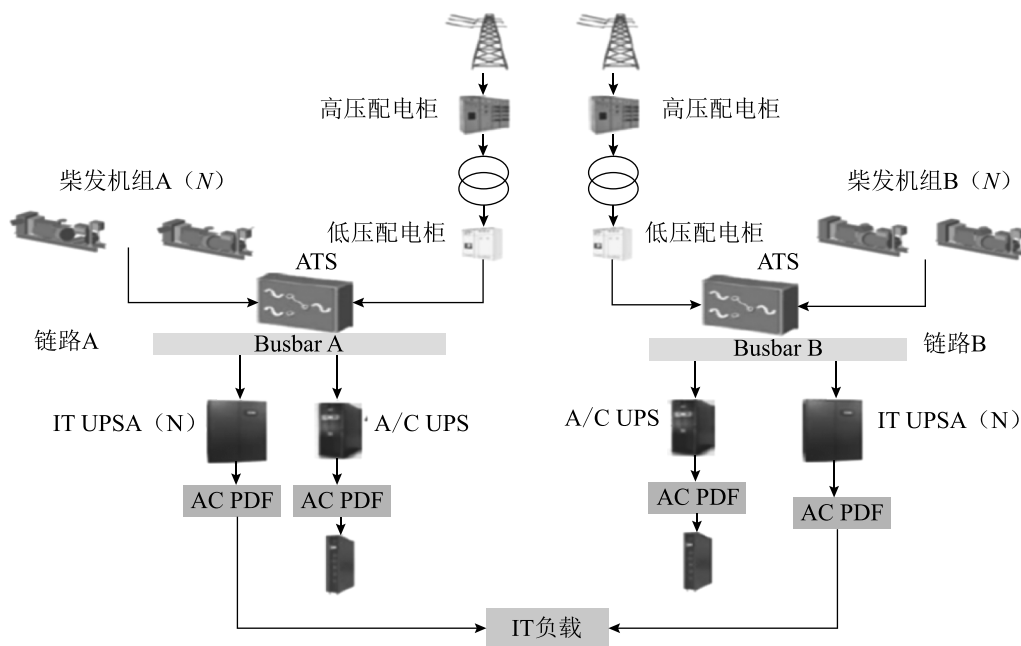


图 4-9 数据中心“容错”型柴发电源系统

4.3.2 柴发电源与市电的切换

在市电正常时，数据中心的终端设备采用市电作为主用电源，柴发电源在市电失电时才给终端设备供电。当市电恢复后，设备仍恢复到由市电供电。因此，在数据中心的配电系统中，不可避免地要涉及柴发电源和市电之间的切换设计和切换操作。

1. 柴发电源与市电的电源端切换和负载端切换

数据中心柴发电源与市电之间的切换按电源切换点在配电系统中的电气位置不同，可分为电源端切换和负载端切换。根据数据中心对供电可靠性的要求以及供配电系统建设的投资规模，选择不同的切换方式。

1) 柴发电源在电源端与市电切换

图 4-10 所示为备用柴发电源与市电的电源端切换设计。柴发电源与市电之间的电源切换点在系统配电母线上游，当分别分、合市电主断路器和柴发电源主断路器时，便

可实现柴发电源与市电之间的切换。采用这种切换方式时，每一个终端设备可以通过单一馈线断路器柜和单回电缆供电，因而配电系统的设备投资较少，但这种配电设计在一定程度上降低了终端设备的供电可靠性，因为馈电线路上任何供电设备故障或计划性检修都将造成终端设备停电，因此不适合直接应用于对供电可靠性要求高的数据中心。可结合图 4-8，将其有效地应用于柴发电源与一路市电的电源切换设计，从而在实现数据中心高供电可靠性的同时，有效降低配电系统的投资成本。

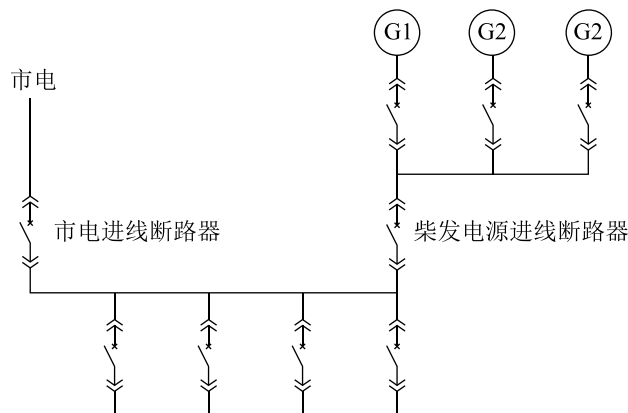


图 4-10 柴发电源与市电在电源端切换

2) 柴发电源在负载端与市电切换

图 4-11 所示为柴发电源与市电的负载端切换设计，电源切换点在配电系统末端的负载侧，通过自动转换开关 ATS 实现柴发电源与市电之间的切换。

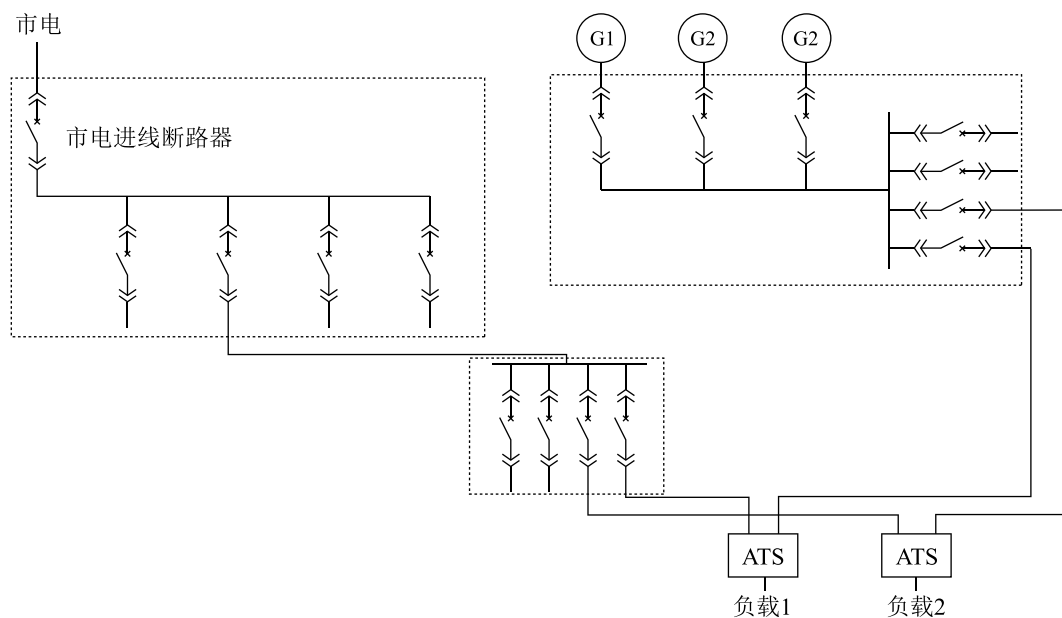


图 4-11 柴发电源与市电在负载端切换

柴发电源与市电在负载端切换时，各负载均需配置两个配电回路，因而配电建设投资明显增加，但各负载的供电可靠性由此得到很大提高。如果采用带旁路的 ATS，则 UPS 上游任何配电设备进行计划性检修时，UPS 的供电都不会中断。但当 ATS 及其下游 UPS 等设备故障时，仍然会造成 IT 负载等终端设备的供电中断。因此，对于市电供电可靠性非常高、ATS 及其下游 UPS 等供电设备的质量很好的小型数据中心，可以采用如图 4-11 所示的设计。在此基础上，再进一步提高配电系统的不停电检修能力和“容错”能力。

2. 柴发电源向市电的断电切换和不断电切换

当市电失电时，数据中心的供电电源要从市电向柴发电源切换，由于柴油发电机组从启动到运行带载需要一个过程，因此这个电源切换过程会造成 UPS 等设备的供电中断。当柴发电源带所有负载运行而市电恢复时，柴发电源向市电切换则不一定造成设备供电中断，供电是否中断取决于柴发电源与市电的切换方式。因此柴发电源向市电切换时，根据是否会造成负载端停电，可分为断电切换和不断电切换两种方式。

1) 柴发电源向市电的断电切换

当柴发电源带所有负载运行而市电恢复时，如果柴发电源在向市电切换时中断了负载设备的供电，则这种电源切换方式为断电切换，如图 4-12 所示。

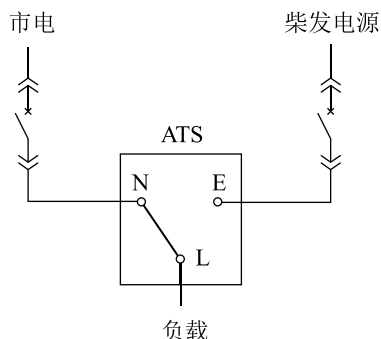


图 4-12 柴发电源与市电的断电切换

电源的自动切换一般由 ATS 完成。当市电正常供电时，负载由市电供电，ATS 的状态如图 4-12 所示，触头掷于左边市电侧；当市电失电时，柴发电机组自动启动，待机组稳定可带负载时，ATS 自动切换到右侧柴发电源供电。当市电恢复正常后，ATS 再自动切回到左侧市电侧，然后柴发电机组冷却停机。可见，对于由“单刀双掷”ATS 完成的断电切换，两次电源切换都会造成 UPS 等下游负载停电。

由于 ATS 的切换速度较快，当 ATS 下游负载为高感抗负载或大容量电动机时，柴发电源向恢复正常的市电切换将导致电动机感应电源与市电非同步并联，从而损坏电动机及电气上临近的其他负载设备，因此需要 ATS 触头在中间位置停留一段时间，为此可选用三位式 ATS，如图 4-13 所示。然后再向市电侧切换，触头在中间位停留时间的

长短取决于电动机电压的衰减时间常数。



图 4-13 三位式和二位式 ATS

在市电因失电和恢复而与柴发电源进行相互切换操作时，由于是断电切换，数据中心 UPS 蓄电池需进行两次充放电操作。因此，在市电供电可靠性较低时，经常性的电源切换会增加蓄电池的充放电次数，从而降低蓄电池甚至 UPS 的使用寿命，因此可能因为数据中心 IT 设备等的高供电可靠性需求而不得不冗余配置 UPS。此外，当通过 ATS 给感性负载供电时，断电切换需要触头在中间位停留一段长短取决于负载的时间，这就增加了 ATS 有效应用的难度。因此，断电切换适用于市电供电可靠性很高的数据中心的非感性负载的电源切换。

2) 柴发电源向市电的不断电切换

在柴发电源带所有负载运行的过程中，当市电恢复时，需要将负载切换回市电供电，如果这个切换不中断负载设备的供电，则柴发电源向市电的切换为不断电切换。

实现柴发电源与市电的不断电切换可采用如图 4-14 所示的具有两套动触头的 ATS，工作过程如下所示。

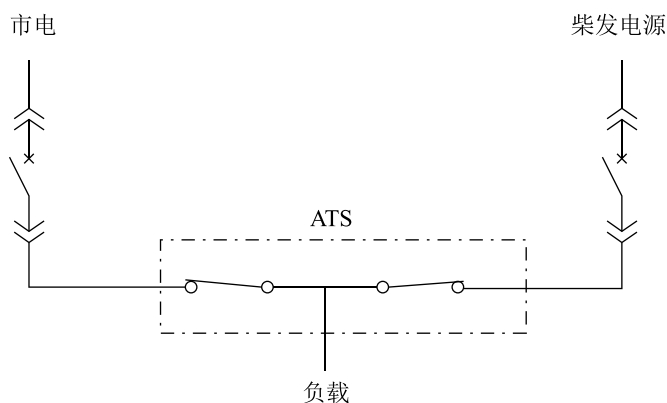


图 4-14 柴发电源与市电的不断电切换

- (1) 市电正常供电时，左侧的动触头闭合，右侧的动触头断开，负载由市电供电。
- (2) 市电失电时，备用的柴发电机组启动，当机组运行稳定可带负载时，ATS 左侧的动触头断开，右侧的动触头闭合，ATS 自动切换到右侧柴发电源。
- (3) 市电恢复正常时，ATS 控制柴发电机组电源与市电同步，达到同步条件时，

ATS 左侧的动触头闭合, 负载由柴发电源与市电同时供电, 然后断开 ATS 右侧的动触头, 完成柴发电源向市电的不停电自动切换。

(4) 柴发机组冷却停机。

可见, 由“双刀双掷”型 ATS 执行的不断电切换在市电失电和恢复时, 只造成 UPS 等负载设备停电一次。柴发电源向市电的不断电切换不会造成电动机的感应电源与市电非同步并联, 因而不会损坏电动机及电气上临近的其他负载设备。

采用不断电切换方式使数据中心所有 UPS 投入 / 退出的频率等于市电停电频率, 为断电切换方式下 UPS 投切频率的一半, 因此当 UPS 设备及配电设备质量很高、市电的供电可靠性很高, 且参考图 4-8 采用双路市电加柴发电源设计时, 可根据终端负载设备需求, 适当减少冗余的 UPS 的数量。此外, 当 ATS 带感性负载且很难估算电源在 ATS 触头的中间位置的停留时间时, 也可考虑采用不断电切换方式。

4.3.3 不同电压等级的电源架构

根据数据中心供电需求, 备用柴发电源系统可采用 0.4kV 低压柴发机组或 10kV 高压柴发机组。不同电压等级的柴发电源系统有不同的电源架构, 当低压备用电源系统在技术上满足不了数据中心供电需求, 或投资成本上明显超过高压系统时, 需要考虑选用 10kV 高压备用电源系统。

1. 0.4kV 低压柴发电源系统

在我国, 数据中心终端设备的电源电压为低压 380V/220V, 采用低压柴发电源作为备用电源系统供电, 在可靠性、经济性等方面具有明显的优势。

1) 系统组成

国内数据中心低压备用电源系统由 0.4kV 低压柴油发电机组、低压断路器柜、低压备用母线及低压电缆等组成, 如图 4-15 (a) 所示。如图 4-15 (b) 所示为低压柴发作为备用电源的供电系统简图, 该系统采用 5 台 0.4kV 低压备用发电机组, 为 4+1 冗余系统。

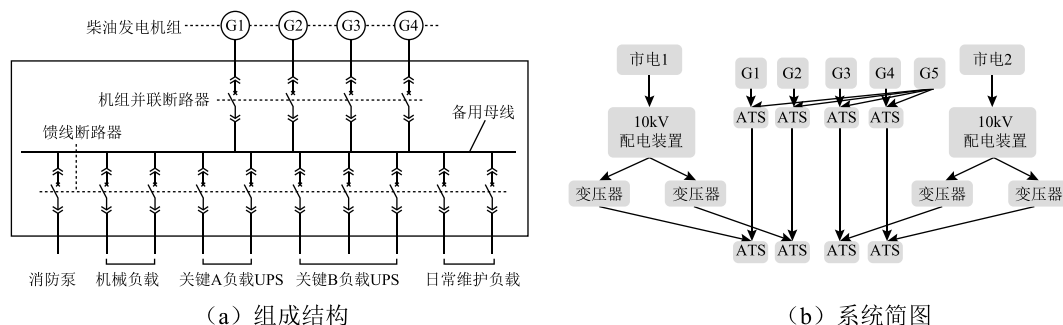


图 4-15 数据中心低压柴发电源系统

2) 系统设计要求

低压柴发电源系统的总容量受到备用母线容量限制和断路器短路保护能力的限制,通常 400V 低压母线的最大容量是 6300A,低压断路器的分断能力有 100kA、130kA、150kA 等不同的等级。在系统设计时需要合理分配负载,防止母线超过允许电流,并依据实际的发电机参数来计算系统的最大短路电流,依据断路器不同的分断能力选择合适的断路器,保证短路电流小于断路器的最大分断电流。当系统的短路电流较大时,还要计算核实下游断路器的选择是否满足其负载的短路分断能力。

(1) 如果数据中心备用电源系统的总装机容量小于备用母线的限流容量,且馈线断路器出口处短路电流小于馈线断路器的短路开断容量,同时大部分终端设备距离柴油发电机组不远,则该数据中心可首选低压柴发电源系统,其设计可参考图 4-15。

(2) 如果馈线断路器出口处短路电流小于馈线断路器的短路开断容量,大部分终端设备距离柴油发电机组不远,但备用电源系统的总装机容量需求在一定程度上大于备用母线的限流容量,则可在图 4-15 所示设计的基础上,通过合理调整并联低压机组与馈线断路器柜的相对电气位置,使备用母线上任何一处的实际工作电流小于母线的极限工作电流。

(3) 如果数据中心的馈线断路器出口处短路电流远大于馈线断路器的短路开断容量,或备用电源系统的总装机容量需求远大于备用母线的限流容量,但终端设备与柴油发电机组的距离对应的低压电缆投资较低,具有很好的经济性,则可以根据馈线断路器的短路开断能力,将终端设备按容量需求分组,并按组匹配一定数量的低压并联机组,同时合理调整各机组-负载组内低压机组与馈线断路器柜的相对电气位置,使备用母线上任何一处的实际工作电流小于母线的极限工作电流。

低压柴油发电机组配置简单,一般配过电流保护(包括过载和短路保护)、过电压保护和低频保护,低压机组并联运行时只需加配逆功率保护和失磁保护。因为系统容量小,因而电气保护比较简单。此外,机组中性点接地方式一般采用直接接地。低压机组的配电系统安装调试简单,维护保养容易,供电范围较小时采用低压机组具有很好的经济性和可靠性。

对于中大型数据中心,由于功率密度高,系统需要 $N+1$ 的备用电源模式,这样在市电失电采用低压柴发电源供电时,正常的工作电流非常大,一方面可能导致电缆投资成本增高,另一方面可能冲击低压备用母线和断路器的 6300A 载流极限。同时,数据中心低压柴发电源系统较大的装机容量使备用母线上各馈线断路器出口的短路电流非常大,对断路器的短路电流开断能力造成巨大挑战。这些都给低压柴油发电机组的应用带来很大的限制。因此,低压柴油发电机组主要应用于小型或分散分布的数据中心。

3) 系统示例

下面以某个数据中心 0.4kV 低压柴发电源系统为例介绍柴发电源系统的运行、保护及控制方式,整个供电系统如图 4-16 所示。

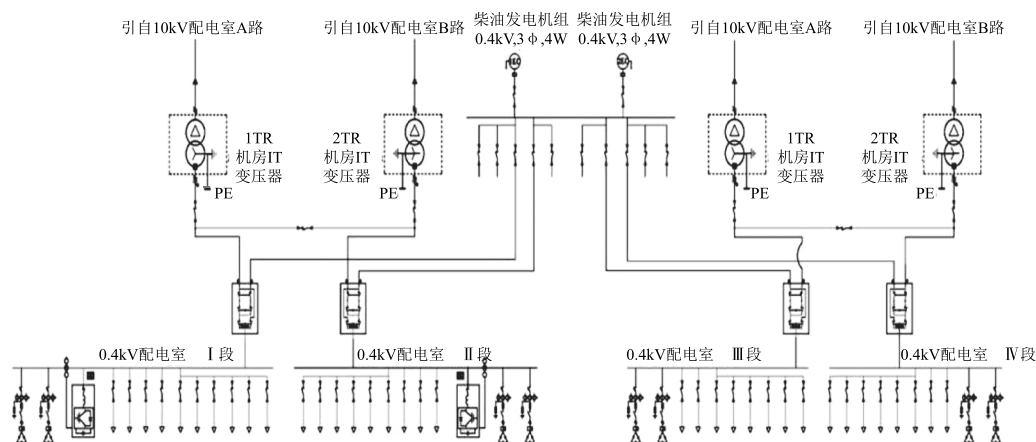


图 4-16 备用电源为 0.4kV 柴油发电机组的配电系统

(1) 运行方式:

① 高压配电室 10kV 主接线采用分段单母线（汇流排）。正常运行时，两路 10kV 电源分别向两段母线供电，此时母联断路器为断开状态。当一路 10kV 电源停电时，母联断路器手动（或自动）投入运行，由第二路电源向两段母线供电，每路电源均可带起全部负载。如果数据中心禁止采用 10kV 母联断路器投切的运行方式，则可以在低压 0.4kV 侧将各母联断路器投入运行，以保证全部负载的供电。

② 10kV 系统配电母线以放射式向各台变压器供电。变压器采用 1+1 配置，每台变压器的负载率不大于 50%。当一台变压器故障时，另一台变压器可带起全部负载。

③ 0.4kV 系统配电母线采用分段单母线运行方式。每两段 0.4kV 系统配电母线设母联断路器，母联断路器可设置为自投（自动投切）不自复（自动恢复）、自投自复、自投手复、手动四种控制状态。

④ 当两段 0.4kV 系统配电母线均失去市电后，柴油发电机组得到信号立即自启动，并机成功后，向低压配电室 0.4kV 系统配电母线供电。当市电恢复后，确认市电各项指标正常，手动完成市电 / 柴电切换，恢复市电供电，然后停止发电机组运行。

(2) 自动装置:

① 0.4kV 系统母联断路器设有备用电源自动投入装置。当一台变压器故障停电后，0.4kV 母联断路器自动投入。当同组两段 0.4kV 系统配电母线市电均失电时，柴油发电机组立即自启运行。0.4kV 系统配电母线的市电和发电机电源之间设有自动（或手动）切换装置，市电失电后，切换装置自动（或手动）切换，0.4kV 系统配电母线由柴油发电机组供电。

② 正常电源与柴发电源之间的切换采用自动转换装置，自动转换装置宜具有检修旁路功能，或采取其他措施，在自动转换装置检修或故障时，不应影响电源的切换。

(3) 电气联锁要求:

① 10kV I、II 段系统配电母线市电进线断路器与母线联络断路器之间设电气联锁，

不允许两路电源并联运行。

② 0.4kV 系统配电母线发电机电源进线断路器与市电进线断路器之间设电气联锁，市电进线断路器全部断开后，发电机电源进线断路器才能合闸，不允许发电机电源和市电并联运行。

③ 柴油发电机电源和市电互投条件应该符合 GB/T 16895《低压电气装置》第 5-54 部分中有关继电保护装置的描述。

2. 10kV 高压柴发电源系统

随着数据中心规模的发展壮大，数据中心需要更大容量的机组作为备用电源，因此高压柴发电源系统成为目前国内外的主流应用方案。高压柴发电源系统降低了系统的短路电流和工作电流，可以有效地增加单个系统的供电容量，供电距离远，为大型数据中心不同区域的电源互相投切提供了方便，也大大地简化了系统中备用电源的设计难度。

1) 系统组成及拓扑结构

国内数据中心高压备用电源系统一般包括 10kV 高压柴油发电机组、10kV 高压断路器柜、高压备用母线及高压连接电缆等，如图 4-17 (a) 所示。如图 4-17 (b) 所示为高压柴发作为备用电源的供电系统简图，该系统采用 5 台 10kV 高压备用发电机组，为 4+1 冗余系统。

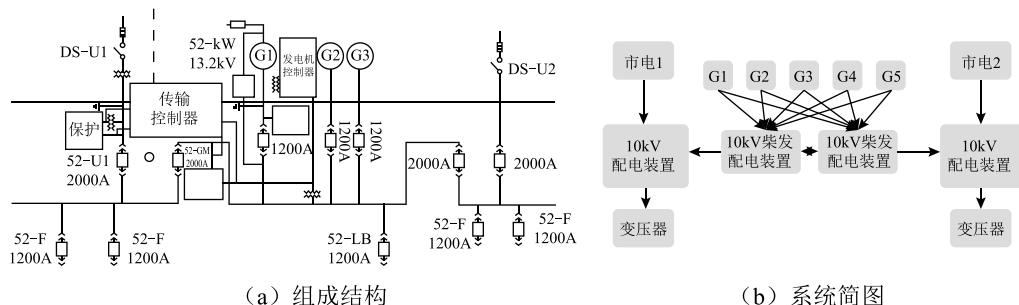


图 4-17 数据中心高压柴发电源系统

数据中心负荷一般较大，因此会用 10kV 机组多台并机的方式进行负荷共担和负荷分配。也有一些小型数据中心考虑到维护的方便性和可靠性，会使用 380V 低压机组并机，或者采用单母线分段联络的方式作为备用电源。

数据中心高压柴油发电机组备用电源系统的拓扑结构多采用单母线、双母线和环路母线的形式。

(1) 单母线：将所有的机组出线均汇集在同一条母线上，再进行电能分配，一般配置一套并机系统，如图 4-18 所示。这种方式接线简单，维护方便，作为备用电源使用性价比很高，一般适用于 $N+1$ 的备用电源系统，但在母线进行检修或者做高压试验的时候，整个备用电源系统无法送出电力。

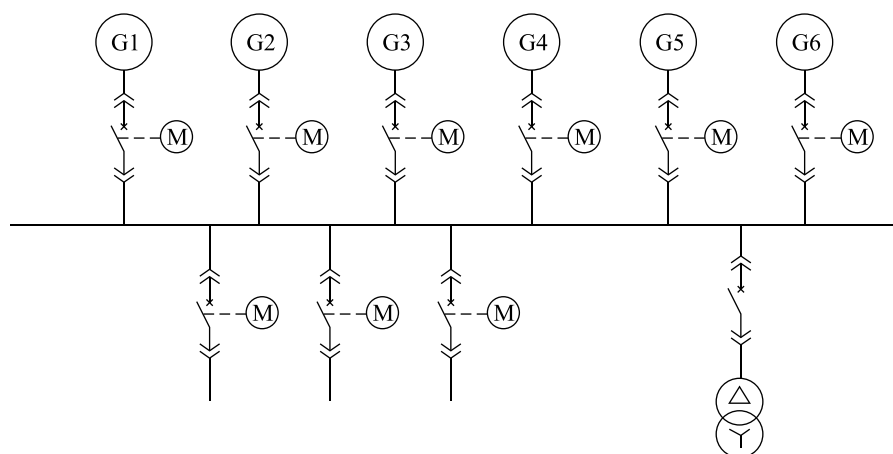


图 4-18 单母线

(2) 双母线：系统具备两条地位对等的汇集母线，每台机组均向两条母线汇集，再从两条母线进行功率分配，如图 4-19 所示。两条母线都配置各自的并机系统，互为备份。双母线具备了完全冗余的母线和并机控制，可靠性高，维护也不复杂，是目前比较容易为用户接受的 $2N$ 接线方式，经常为保障等级较高的数据中心采用。

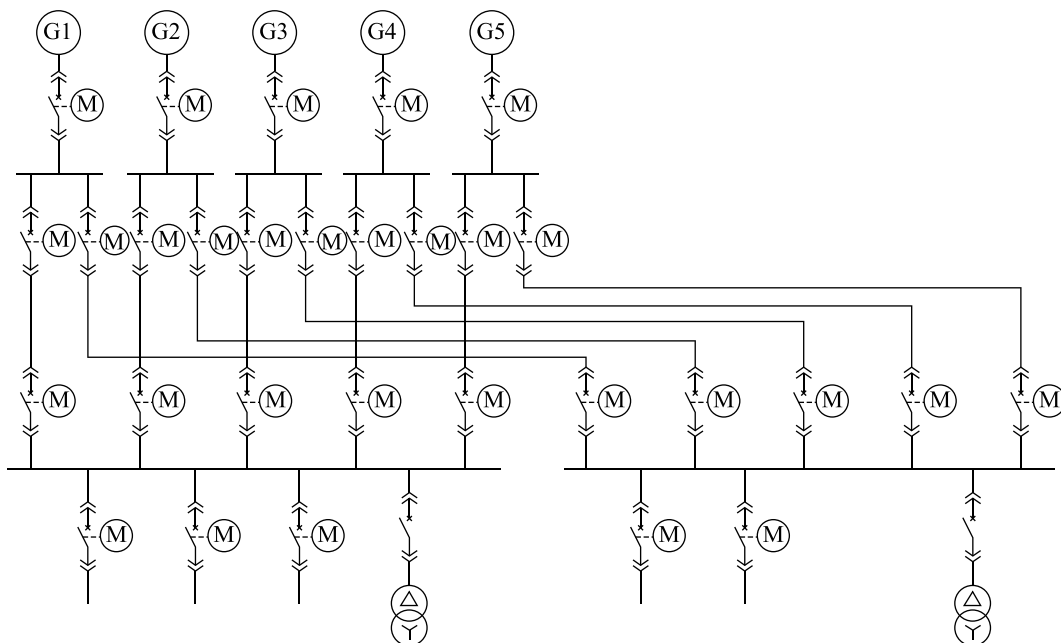


图 4-19 双母线

(3) 环路母线：对于大型数据中心园区，一般需要配置多套柴油发电机组的并机系统作为不同负荷模组的备用电源，这时每条母线可以仅配置数量为 N 的机组容量，使用统一的配置了 N 台机组容量的母线作为备用母线，形成环网，互相联络，如图 4-20 所示。当系统中母线增多时，要注意两个问题：一是正常运行下负荷分配和机组

投 / 退的逻辑问题；二是短路故障时各级断路器间的保护配合问题。

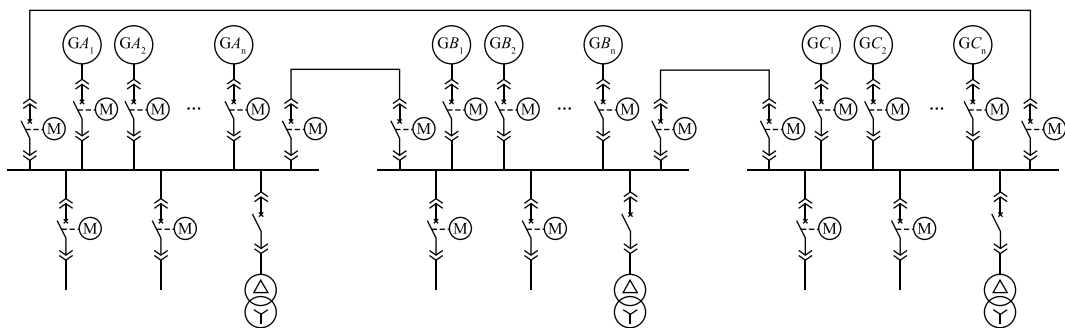


图 4-20 环路母线

3) 系统设计要求

与低压发电机组相比，高压发电机组具有较高的工作电压，因此对于机组的设计、运行、维护和保养有特别的要求。

(1) 需要特殊关注高压发电机的绝缘，例如配备防冷凝加热器可以有效地使高压发电机的绝缘保持干燥，从而使其绝缘特性维持在良好状态。此外，需定期对其绝缘特性进行监测。低温环境应用时需要房间进行保温和加热处理，不能使发电机绝缘长期暴露在 -15°C 以下，否则需要在发电机启动时预热，防止过大的快速温差变化导致高压绝缘损坏。

(2) 定子绕组可配置电晕放电屏蔽，且需要考虑海拔高度变化对电晕放电的影响，例如海拔高度超过 3000m 时需要有特殊的考虑。

(3) 高压机组在低压机组电气保护的基础上，可以增加差动保护。为了限制系统单相接地电流，需要设计中性点接地电阻。

(4) 高压柴发电源系统中主要用到的真空断路器在开断电流时容易产生截流过电压，因此要求系统必须配置操作过电压保护，防止造成断路器相间击穿。高压柴发电源通常在高压侧与市电进行电源切换，对于市电的切换和机组高压断路器的保护整定设计需要符合相应的规范，对于系统的运行方式需要与当地的电力部门及时沟通。在系统的接地保护方面也需要做统筹的考虑。

(5) 由于高压导体具有较高的电位，容易产生高压放电等危险，因此高压电缆及其电缆头的选择和安装需要符合电力行业的要求。

(6) 高压柴发电源系统较低压电源系统更为复杂，对于运行维护人员的资质具有较高的要求，需要取得应急管理局的高压作业证。

4) 系统示例

下面是某数据中心 10kV 柴发配电系统的运行方式及保护控制逻辑，整个供电系统如图 4-21 所示。

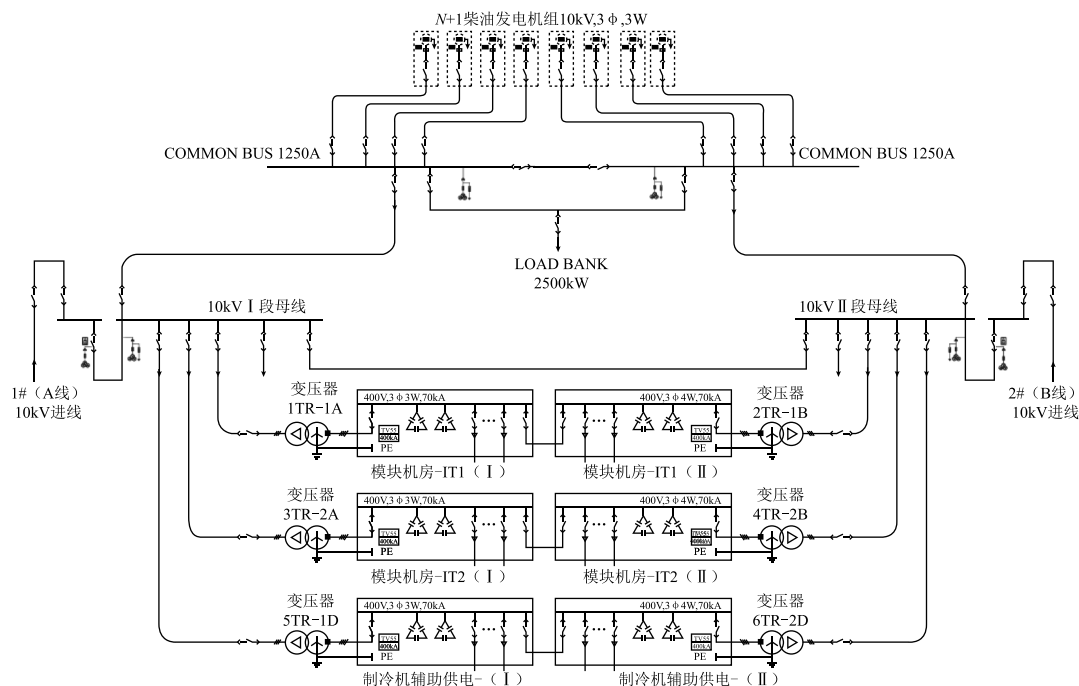


图 4-21 备用电源为 10kV 柴油发电机组的配电系统

(1) 运行方式:

① 高压配电室 10kV 主接线采用分段单母线, 如图 4-21 所示。正常运行时, 两路 10kV 电源分别向两段系统配电母线供电, 此时母联断路器为断开状态。当一路 10kV 电源停电时, 母联断路器手动 (或自动) 投入运行 (此种运行方式需要与当地的电力部门沟通并得到许可), 由第二路电源向两段系统配电母线供电, 每路电源均可带起全部负载。

② 10kV 系统配电母线以放射式向各台变压器供电。变压器采用 1+1 配置, 每台变压器的负载率不大于 50%。当一台变压器故障时, 另一台变压器可带起全部负载。

③ 0.4kV 系统配电母线采用分段单母线运行方式。每两段 0.4kV 系统设母联断路器, 断路器可自动投切。

④ 当两路 10kV 市电均失电后, 柴油发电机组得到信号后自启动, 并机成功后, 向高压配电室两段 10kV 系统配电母线供电。当市电恢复后, 确认市电各项指标正常, 手动完成市电 / 柴电切换, 恢复市电供电, 然后停止发电机组运行。

(2) 自动装置:

① 柴油发电机组需具备快速自启动 / 手动启动功能。

② 10kV 系统配电母线的市电和发电机电源之间设有自动切换装置, 市电失电后, 切换装置可自动切换, 10kV 系统配电母线由柴油发电机供电。为保证绝对安全, 有些数据中心要求采用手动切换方式将柴油发电机电源输送到 10kV 系统配电母线。

③ 低压侧配合高压侧具有更多选择性时, 0.4kV 系统母联断路器通常设有备用电源自动投入装置, 当一台变压器故障停电后, 0.4kV 母联断路器自动投入。母联断路器可设置为自投不自复、自投自复、自投手复、手动四种控制状态。

(3) 电气联锁及机械连锁要求:

① 10kV I、II 段系统配电母线市电进线断路器与母线联络断路器之间设有电气联锁, 不允许两路电源并联运行。

② 10kV I、II 段系统配电母线发电机电源进线断路器与母线联络断路器之间设有电气联锁, 不允许两路电源并联运行。

③ 10kV I、II 段系统配电母线发电机电源进线断路器与市电断路器之间设有电气联锁, 市电断路器全部断开后, 发电机电源进线断路器才能合闸, 不允许市电与柴油发电机电源并联运行。

④ 柴油发电机电源和市电互投条件应该符合 GB/T 16895《低压电气装置》第 5-54 部分中有关继电保护装置的描述。

4.3.4 柴油发电机并机母线之间母联的设置分析

在数据中心的设计过程中, 当柴油发电机组做双母线并机输出时, 应根据不同的配置确定是否需要添加并机母线间的母联断路器。

1. 柴油发电机 2N 配置, 需要在并机母线之间增加母联

国内早期高等级的数据中心在进行柴油发电机电源系统架构设计时, 柴油发电机组几乎都是 2N 配置, 如图 4-22 所示。

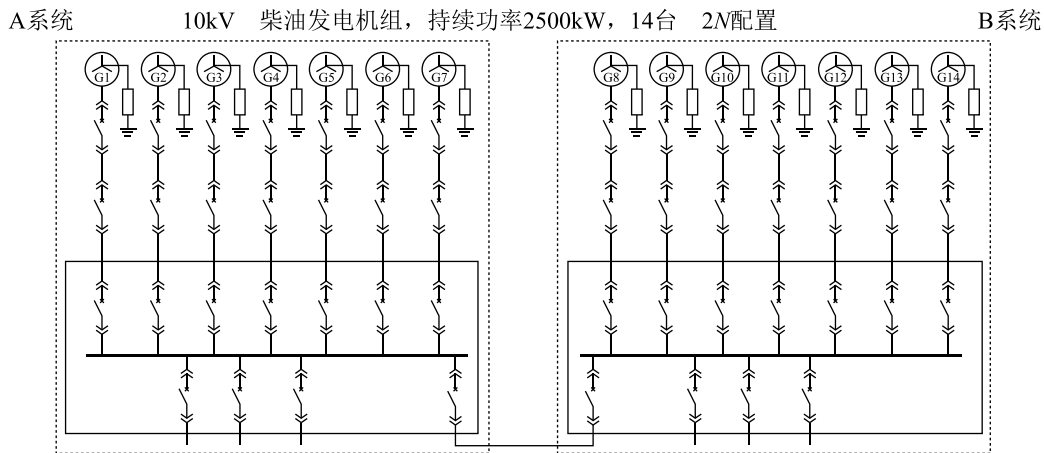


图 4-22 2N 配置的柴发电源系统架构

柴油发电机 A 系统和 B 系统均采用 7 台持续功率为 2500kW 的柴油发电机组。其中, A 系统的 7 台柴油发电机组并机到 A 系统的并机母线, B 系统的 7 台柴油发电机组并机到 B 系统的并机母线。数据中心的总负荷为 15 000~17 500kW, 由于采用 2N 配置, 因此单侧 N 台柴油发电机组总容量大于该总负荷。在市电全部失电时, 柴发电源系统启动, 带数据中心全部负荷。

当 A 系统的柴油发电机组有任何一台出现故障或 A 系统的柴发需要维护、维修时，A 系统的全部柴油发电机组都需要隔离出来而退出运行序列，在此情况下，末端 IT 设备单电源运行。为了进一步提高此期间的供电可靠性，便产生了并机母线间的联络（母联）。如并机母线间无此母联，则 B 系统通过并机母线及变压器、UPS 等为 IT 设备单侧供电。当 B 系统再出现故障时，例如此路径上的 UPS 出现故障，末端 IT 设备将失去全部电源而中断运行。如并机母线间增加了母联，则 B 系统的并机母线（B 段）可通过母联及 A 系统并机母线（A 段）为 A 侧提供配电，末端 IT 设备可以实现双侧供电，当再出现故障时，例如 B 路径上的 UPS 故障，末端 IT 设备仍有一侧可以正常供电，避免了运行的中断。

2. 柴油发电机组 N+1 配置，无须在并机母线之间设置母联

目前数据中心在进行柴发备用电源系统设计时，柴油发电机组一般采用 N+1 配置，在保障可靠性的同时，降低了投资和运行成本。在 N+1 配置时，双并机母线之间无须设置母联断路器。

如图 4-23 所示，数据中心柴发电源系统按 N+1 配置柴油发电机组，柴发电源系统由 7 台（6+1）持续功率为 2500kW 的柴油发电机组组成。每台柴油发电机组通过双输出柜分别并机到 A 侧并机母线和 B 侧并机母线，数据中心的总负荷为 12 500~15 000kW，不大于 6 台柴油发电机组运行的总负荷。在市电全部失电时，柴发电源系统启动，带数据中心全部负荷。

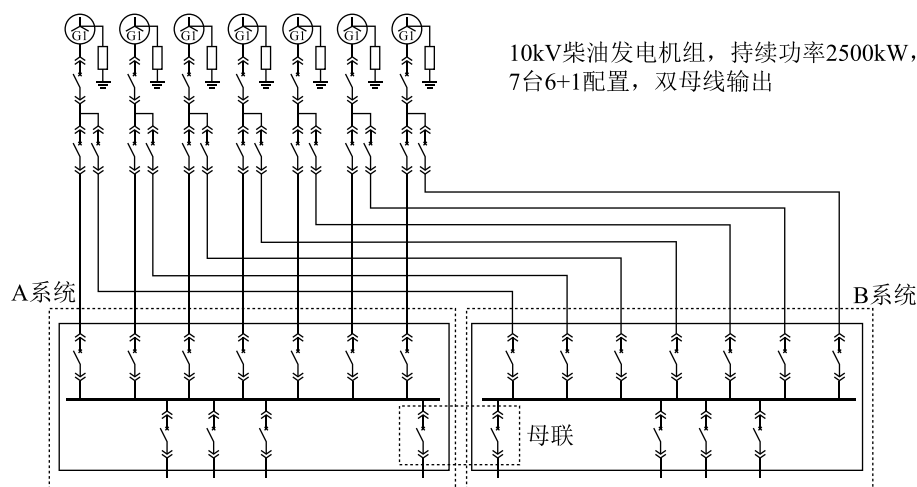


图 4-23 柴油发电机组 N+1 配置，双母线输出

当柴油发电机组有任何一台出现故障或需要维护、维修时，此台柴油发电机组可以单独隔离出来，其他柴油发电机组仍正常并机输出到双并机母线，为后续设备正常供电，即末端 IT 设备仍可以双侧供电。当任何一侧的并机母线需要维护、维修时，只有另一侧的并机母线正常使用。因此，在柴油发电机 N+1 配置且双并机母线输出的情况下，并机母线之间的母联设置是没有意义的，也无法提高系统的可靠性。