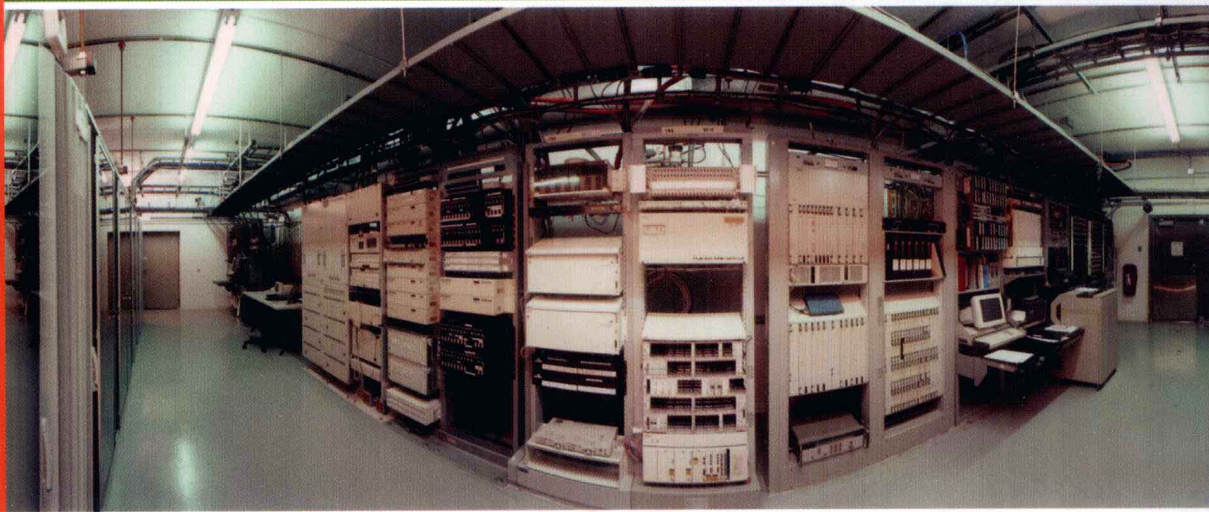




新能源工程应用系列丛书

数据中心UPS供电系统 设计与故障处理

◎ 周志敏 纪爱华 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

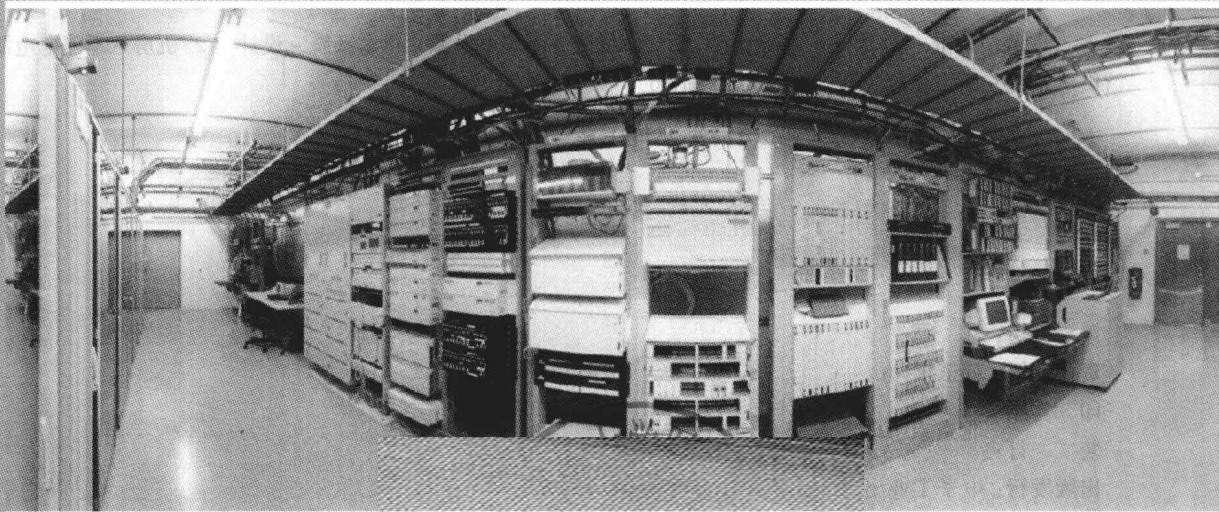
<http://www.phei.com.cn>



新能源工程应用系列丛书

数据中心UPS供电系统设计 与故障处理

◎ 周志敏 纪爱华 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

前 言



随着电子信息技术的高速发展，数据中心逐渐成为信息中心的枢纽。良好的供配电系统是保证数据中心计算机设备、场地设备及辅助用电设备安全运行的先决条件。为保证数据中心的供电质量，要求有独立配电系统、双电源互投系统与 UPS 组成的供配电系统。UPS 作为一种重要可靠的电源，已从最初的提供后备电源的单一功能，发展到今天提供后备电源及改善电网质量的双重功能，在保护用电系统数据、改善电网质量、防止停电和电网污染对用电系统造成危害等方面起着很重要的作用。

在数据中心 UPS 供电系统设计中，通过优化数据中心 UPS 供电系统的可靠性，可提高数据中心 UPS 供电系统的可用性，并对数据中心 UPS 供电系统进行最有效的管理，从而构建一个绿色的数据中心电源系统。

本书以数据中心 UPS 供电系统设计与故障处理为核心，在写作上尽量做到有针对性和实用性，力求做到理论和实践相结合，使得从事数据中心 UPS 供电系统工程设计、应用、维护及检修的工程技术人员从中获益。读者可以以此为“桥梁”，系统全面地了解 and 掌握数据中心 UPS 供电系统的工程设计和应用技术。

参加本书编写工作的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、纪达安、纪和平、刘淑芬等。在本书的编写过程中，从资料收集到技术信息交流都得到了国内外专业学者和同行的大力支持，在此表示衷心感谢。

由于时间短，加之作者水平有限，书中错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编著者

目 录



第 1 章 概述	1
1.1 数据中心定义及构建核心要素	1
1.1.1 数据中心定义	1
1.1.2 数据中心供配电系统	3
1.1.3 数据中心不间断安全供电平台	5
1.1.4 数据中心供电模式	9
1.2 数据中心供电系统的可用性与发展趋势	13
1.2.1 数据中心供电系统的可用性	13
1.2.2 数据中心供电系统的发展趋势	19
第 2 章 UPS 供电系统	26
2.1 UPS 概述	26
2.1.1 UPS 的定义及特点	26
2.1.2 UPS 的组成、电路结构、主要参数及可靠性指标	27
2.1.3 UPS 的分类	37
2.2 UPS 的冗余技术	43
2.2.1 USP 的热备份连接	43
2.2.2 UPS 的并联连接	46
2.2.3 UPS 供电方案的可靠性与可用性	53
2.2.4 UPS 冗余技术的高可用性	62
2.2.5 UPS 冗余方式的选择	64
2.2.6 双总线 UPS 冗余系统	66
2.2.7 “热同步” UPS 并机供电系统	68
2.2.8 T 形连接的 UPS 并联运行方案	73
第 3 章 数据中心 UPS 供电系统设计	75
3.1 数据中心的供电环境	75
3.1.1 公共电网干扰	75
3.1.2 数据中心供电环境对 UPS 的要求	78
3.1.3 数据中心 UPS 供电特点及负载	81
3.1.4 数据中心的供配电设计	85
3.2 UPS 及蓄电池的选择	87
3.2.1 UPS 的选择	87
3.2.2 蓄电池的选择	96

3.3	数据中心 UPS 供电系统设计实例	102
3.3.1	绿色数据中心 UPS 供电系统	102
3.3.2	数据中心 UPS 供电系统解决方案	107
3.3.3	数据中心 UPS 冗余供电系统设计案例	111
3.3.4	APC Silcon 系列 UPS 解决方案	116
3.3.5	台达 UPS 的电源管理功能	122
3.3.6	安圣 iTrustUPS 的组网解决方案	126
3.3.7	UPS 监控系统的构成	129
第4章	UPS 和蓄电池的使用与维护技术	136
4.1	UPS 的使用与维护	136
4.1.1	UPS 的安全使用	136
4.1.2	UPS 的日常维护与测试	141
4.2	蓄电池的使用与维护	144
4.2.1	蓄电池的安装	144
4.2.2	蓄电池的正确使用	146
4.2.3	蓄电池的维护	149
4.2.4	UPS 系统中蓄电池维护解决方案	152
4.2.5	延长蓄电池使用寿命的有效措施	154
4.3	蓄电池的测试	156
4.3.1	蓄电池的测试项目	156
4.3.2	蓄电池的测试方法	157
4.3.3	蓄电池容量的检测	158
4.3.4	蓄电池内阻的检测技术	160
4.4	UPS 的故障性质及故障检修实例	166
4.4.1	UPS 的使用性故障	166
4.4.2	STAND - 500 UPS 故障检修实例	171
4.4.3	SANTAK - 500 UPS 故障检修实例	171
4.4.4	SENDON - 600 UPS 故障检修实例	174
4.4.5	HANSAMODELFH - 500 UPS 故障检修实例	174
4.4.6	APC Silcon DP320E UPS 故障检修实例	175
4.4.7	燕标 2kVA UPS 故障检修实例	177
4.4.8	山特 C 系列 3kVA UPS 故障检修实例	179
4.4.9	山特 8222 型 UPS 故障检修实例	190
4.4.10	山特 500VA 后备式 UPS 故障检修实例	192
4.4.11	山特城堡系列 UPS 常见故障及解决方法	193
4.4.12	FUDEN 的 1kVA UPS 故障检修实例	194
第5章	阀控密封式铅酸蓄电池典型故障分析	196
5.1	阀控密封式铅酸蓄电池早期失效和自放电故障分析	196
5.1.1	阀控密封式铅酸蓄电池早期失效故障分析	196

5.1.2	阀控密封式铅酸蓄电池自放电故障分析	200
5.2	阀控密封式铅酸蓄电池典型物理故障分析	201
5.2.1	阀控密封式铅酸蓄电池变形故障分析	201
5.2.2	阀控密封式铅酸蓄电池发生爆炸故障分析	203
5.2.3	阀控密封式铅酸蓄电池漏液故障分析	204
5.2.4	阀控密封式铅酸蓄电池胀裂故障分析	208
5.3	阀控密封式铅酸蓄电池典型化学故障分析	209
5.3.1	阀控密封式铅酸蓄电池失水及干涸失效故障分析	209
5.3.2	阀控密封式铅酸蓄电池极板硫化故障分析	216
5.3.3	阀控密封式铅酸蓄电池热失控故障分析	220
5.3.4	阀控密封式铅酸蓄电池极板典型故障分析	223
5.3.5	阀控密封式铅酸蓄电池组均衡性差故障分析	229
5.3.6	阀控密封式铅酸蓄电池达不到设计使用寿命故障分析	232
第6章	 铅酸蓄电池修复	238
6.1	铅酸蓄电池修复技术及修复方法	238
6.1.1	铅酸蓄电池修复技术	238
6.1.2	铅酸蓄电池修复方法	240
6.2	铅酸蓄电池的修复	246
6.2.1	铅酸蓄电池修复程序	246
6.2.2	落后铅酸蓄电池的修复	255
6.2.3	硫化铅酸蓄电池的修复	257
6.2.4	SK-6D 微电脑正、负离子铅酸蓄电池修复仪	258
6.2.5	S-9910 数控离子变频铅酸蓄电池修复仪	263
6.2.6	单格铅酸蓄电池的修复	264
6.2.7	100Ah 以上铅酸蓄电池的修复	268
6.2.8	BR-2 型铅酸蓄电池修复器	271
6.2.9	铅酸蓄电池综合检修设备	274
参考文献	278

第1章 概述

1.1 数据中心定义及构建核心要素

1.1.1 数据中心定义

数据中心 (Data Center) 是大范围协作的特定网络设备的组合, 用来在网络基础设施上加速信息的传递, 以外包方式让许多网上公司存放它们设备 (主要是网站) 或数据的地方, 是场地出租概念在因特网领域的延伸。数据中心又可以细分为世界数据中心 (World Data Center, 简称 WDC)、中国互联网数据中心 (Data Center of China Internet, 简称 DCCI)、企业级数据中心 (Enterprise Data Center, 简称 EDC) 及其他数据中心等。

1. 世界数据中心

WDC 是国际科学联合会下设的科学数据组织, 有四十多个学科数据中心, 分属 4 个数据中心群: WDC - A 美国、WDC - B 前苏联、WDC - C 欧洲和日本、WDC - D 中国。

1988 年, 中国加入 WDC, 并建立世界数据中心中国中心 (World Data Center D)。WDC - D 组织机构包括中国国家协调委员会、科学委员会、中国中心协调办公室、科学委员会秘书处及 9 个学科数据中心。

2. 中国互联网数据中心

DCCI 是中国互联网独立的第三方市场监测、测量平台及专业数据采集与研究平台, 通过线下、线上等不同渠道, 采用专业研究人员与技术相结合的手段, 面向产业市场、用户两个方向, 进行动态、精确的监测、测量、统计、分析、研究、预测。

DCCI 采用统一的方法、统一的样本、统一的定义、超大的样本量、精确有效的样本结构、动态持续的深度监测。DCCI 通过中国互联网领域最大规模市场用户调查等工作, 首次实现了对中国互联网各类市场领域、各个企业服务、互联网用户的统一测量, 由此实现了不同细分市场、不同企业服务、不同用户群体的统一研究, 实现了横向、纵向、点对点的统计、分析及不同网络媒介之间真正意义上的可比较性。

DCCI 依托互联空间 (北京) 数据技术研究中心的专利技术、研究力量, 联合中国互联网权威行业组织、优秀研究机构、知名分析师等, 为国内外从事与互联网有关的商业运营、投资决策、技术开发及相关研究的企业、机构等, 提供独立第三方的、值得信赖的市场监测与测量服务。

3. 企业数据中心

企业数据中心通过实现统一的数据定义与命名规范、集中的数据环境，从而达到数据共享与利用的目标。企业数据中心按规模划分为部门级数据中心、企业级数据中心、互联网数据中心及主机托管数据中心等。其中，互联网数据中心是一种以电信级机房设备向用户提供专业化和标准化的数据存放业务及其他相关服务的中心。用户可通过数据中心的主机托管、整机租赁、虚拟主机等服务，租用数据中心的技术力量，搭建自己的互联网平台。企业级数据中心的发展趋势是具备高度的灵活性和适应性，能根据外部需求做出快速变化。

4. 绿色数据中心

时下的经济环境，让企业更加关注投入产出率，更加严格地控制预算和成本。而“绿色”、“低碳”也已成为企业不可忽视的名词。随着绿色科技的概念全面性进入消费者与企业环境中，过去只讲求“生产力”、“效率”的数据中心，或者俗称的机房，已无法适应这种趋势。如今的数据中心结构发生着意义深远的改变，自局域网得到大规模普及以来，IT 领域发生的最显著变化可能就是 IP 与存储网络的统一。

新一代数据中心体系结构的转变已经不仅是利用以太网光纤通道来运行存储流量那么简单，而是在万兆以太网基础上建立一个独立的统一网络结构，用万兆以太网来承担数据中心的各种流量，从数据到声音，到存储，到高性能集群都应如此。

随着时间的推移，数据中心的指标定义也在不断变化，在两三年前，100m² 以下的机房可以定义为小型数据中心，但是随着机房逐渐集中化、大型化，当前 200m² 以下的机房定义为小型数据中心更为贴切。统一数据中心基础结构从长远来看有两方面的优势：

① 能降低成本。因为能提高利用率，减少线缆和网络连接，所以能减少基建投资。更重要的是，统一数据中心有望降低运营成本，由于能实现数据中心管理自动化，在简化工作负载的同时也降低了所需的劳动力成本。并且与对存储和网络分别管理的方式相比，数据中心只需要一个基础结构团队就能实现整个数据中心的统一管理。

② 统一数据中心基础结构能通过虚拟 IP 和光纤通道存储网络增加 IT 的灵活性。通过单一的控制台就能实现管理需求，不再需要安装新的应用软件、改变存储容量、对线缆重新分配或按照存储和网络团队的互连需求来做出改变。统一数据中心基础结构有望让企业与处理能力、网络带宽和它们随着需求改变进行分摊的存储容量等统一模式结合得更加紧密。

统一数据中心基础结构获得关注的另一个原因是向虚拟化的大举挺进也在暴露自身的问题。数据中心结构师需要虚拟服务器有更多的连通性，因为与过去服务器仅用于一种应用软件的时代相比，虚拟机要用于多种用途，那时的服务器所需的连通性是相对有限的，而服务器需求的连通性要求已经大大提高。除了存储和网络方面面临的难题外，分别管理物理服务器和虚拟服务器的复杂性也会日益增长。

统一数据中心基础结构真正的价值在于操作的灵活性。如果厂家能交付统一、虚拟的基础结构，逻辑基础结构的管理像物理基础结构的管理一样统一化，那么只需要一个 IT 团队就能实现对整个网络的运营、监控和管理，使用一个控制台就能管理存储和标准 IT 的流量。

在 20 世纪 90 年代末，企业为了共享存储系统建立了独立网络，利用光纤通道来连接存储阵列。同时，以 IP 为基础的本地局域网的使用也向服务器到服务器互连、服务器到用户

互连、IP 电话传输及与许多其他服务连接等方向发展。

数据中心面临的物理问题是服务器本身和用来连接这些服务器到其他应用环境的线缆。通常服务器至少有两个双端口光纤通道总线适配器来连接存储，两个双端口网络接口卡来连接 IP 网络。这 4 个卡插槽和 12 个线缆插件意味着可供扩展的空间寥寥无几，无数的线缆和大面积的数据中心占据空间。从管理的角度来看，这需要 IT 部门事先计算物理光纤通道的配置，进行安装、管理和维护。



1.1.2 数据中心供配电系统

数据中心作为信息中心枢纽，承载着关系企业核心信息的服务器，供配电系统对于数据中心整体运行的重要性可谓是牵一发而动全身。然而，电源作为数据中心的基础要素之一，断电或低质量供电都是造成数据中心服务器停机的一大主要因素。如何对数据中心电源系统进行设计和智能化管理，以确保数据中心服务器及其他硬件设备持续运行，是众多数据中心管理者面临的重大问题。

对于数据中心的供配电设计方案，首先必须要对整个数据中心各种应用的整体情况有一个清晰的了解，然后再针对这些问题提出一个整体解决方案，只有这样，才能使数据中心的供配电系统具有高的效能、高的可用性和可靠性。对于供配电系统来说，在外电源满足的情况下，数据中心的设计要在预定的生命周期内满足数据中心各种应用的需求，并要做到随需而变。

良好的供配电系统是保证数据中心的计算机设备、场地设备及辅助用电设备安全运行的先决条件。为保证计算机设备的供电质量，机房场地要求有独立配电系统、双电源互投系统与 UPS 组成的供配电系统。对于很多大型服务器等设备，要达到一级负荷标准，还需要做到可靠的接地。通过配置蓄电池优化 UPS 系统可靠性，在外部电源失电的情况下，节能环保型的发电机采用自动或手动的启动功能，通过供电线路继续给负载提供不间断、稳定的供电，以提高数据中心供电系统的高可用性。另外，随着数据中心规模的不断扩大，数据中心正在成为名副其实的耗能大户，为此要对数据中心的能耗做出最有效的管理，即构建一个绿色的数据中心。

1. 数据中心供配电系统的特点

数据中心的供配电系统有其自身的特点，概括起来主要是：连续、稳定、平衡和分类。

① 连续是指为用电设备的不间断供电，但瞬时断电的情况时有发生。瞬时断电时间在国内尚无标准，一般采纳 4ms。

② 稳定主要是指电源电压稳定，波形失真小。

③ 平衡主要是指三相电源平衡，即相角平衡、电压平衡和电流平衡。在国家标准《计算机场地技术要求》中未列出三相不平衡的允许值，但有些计算机的生产厂家对此项有明确要求。

④ 而分类就是指对计算机和外围设备、辅助设备的供配电分开进行，根据计算机设备的供电要求，合理地选择电力设备保护开关等，构成符合计算机设备要求的供配电系统。辅助供配电系统包括为了保证计算机设备能正常运行的其他设备，如空调、动力设备、照明设备和测试设备等。

针对数据中心采用的 UPS 等电源系统应该采用节省空间的紧凑式设计, 具有内置旁路维护开关及可扩展的蓄电池, 尽量降低总体成本, 还应具有用户友好的智能及系统管理功能。

2. 数据中心供配电规划

随着数据中心产品的科技进步, 设计理念的日益创新, 数据中心的功率密度逐年加大。一般而言, 高功率密度数据中心现在主要是指每平方米平均功率大于 2500W 的数据中心, 具体详细划分如表 1-1 所示。

表 1-1 数据中心功率密度与每平方米平均功率的关系

每平方米平均功率	数据中心功率密度	每平方米平均功率	数据中心功率密度
400W/m ² 以下	超低功率密度数据中心	2500~6000W/m ²	中、高功率密度数据中心
400~900W/m ²	低功率密度数据中心	6000~10 000W/m ²	高功率密度数据中心
900~2500W/m ²	中、低功率密度数据中心	10 000W/m ² 以上	超高功率密度数据中心

随着刀片式服务器的应用越来越普及, 高功率密度数据中心的电源问题变得更加突出。数据中心的电力供应规划应在满足目前使用供电容量要求的同时充分考虑远期业务发展的扩容需求。条件允许时应当采用双路不同变电站高压市电输入加自备发电机供电的方式, 每路高压市电电源、发电机备用电源均应能够承担数据中心内的全部负荷。数据中心的配电系统建设应充分考虑分期建设或后期逐步进行内部处理的特点, 在设计时应考虑分步实施的可行性, 避免后来的施工对前期投产环境产生不良影响。

一般情况下, 服务器和存储的能耗占数据中心总能耗的 30%~50%, 供电、制冷、加湿、照明等设备能耗的大小直接影响着数据中心的总能耗水平。随着服务器变得越来越小, 典型数据中心的机架功率密度正以惊人的速度提高。为这些服务器提供不间断的电源供应已日益受到严重挑战, 特别是考虑到未来的电源需求将增长 40%~76%, 这一挑战将尤其严重。

为保证市电中断时, 数据中心关键设备的供电不中断, 数据中心应自备发电机作为备用电源。自备发电机设备容量、数量应按实际负载容量及种类计算配置, 同时还要考虑预留柴油发电机组未来扩容所需要的负荷。

为了满足数据中心对供电系统的高可靠性要求, 应采取必要的技术措施消除可能出现在 UPS 本身及输出端的各种故障隐患。行之有效的办法就是配置 UPS “双总线输出” 配电系统。在变压器容量配置上考虑变压器负载 100% 冗余热备份, 有条件时应考虑独立设置 UPS 专用变压器, 同时考虑预留低压系统未来扩容的可能性。

考虑到经济性, 数据中心供配电系统的规划和设计应根据负载不同的用电安全等级合理配置 UPS 系统。先期应当考虑经济合理的冗余方式, 后期根据实际需要最高可升级到 2N 并机双母线冗余 (或更高安全等级) 方式。

空调系统的供电应当采用独立双回路配电系统, 同一区域内空调设备采用分组供电方式, 避免大面积同时供电中断情况的发生, 保证空调设备全年 365×24h 运行。

数据中心雷电防护应当符合《建筑物电子信息系统防雷设计规范》A 级标准要求, 应当具有完备的建筑避雷及引雷装置。良好的防雷接地可以使建筑免受雷电威胁, 同时应进一

步采取必要措施（如接地、室外控雷技术等）避免因雷电引发的对数据及 IT 系统的二次破坏或干扰。

在变配电室低压母线上应设置一级浪涌保护器（SPD），UPS 输入配电柜、UPS 输出柜、数据中心空调配电柜应设置二级浪涌保护器，配电单元（PDU）内应安装三级浪涌保护器，所有其他与室外有关的配电设备和线路均应安装一级浪涌保护器。

计算机系统接地，要求采用公用接地系统。若有特殊要求则可留有安全保护地、防静电接地、交流工作地（零线接地）、直流逻辑地及防雷接地端子。接地装置的设计应满足接地电阻值小于 1Ω 的要求。

1.1.3 数据中心不间断安全供电平台

数据中心的供电仿佛人体的血液流动，不能有一刻中断，可靠、不间断的供电系统就是数据中心业务运行的有力保证。对于数据中心，即使供电系统出现几秒钟的故障，也可能造成硬件设备损坏、重要数据丢失、重要订单无法接发等，严重的还会影响企业的正常运营或造成更大的经济损失。因此，自我保护是当前解决电力供应问题的现实之举，而 UPS 能够有效地解决停电事故、电力故障、质量不稳定的问题，构筑高可靠的电源解决方案已经被越来越多的行业用户所关注和重视。

随着行业的发展和网络的应用，越来越多的大型数据中心供电系统需要大功率 UPS 系统的全力保护。大型 UPS 系统，已经不仅是单纯的在停电后继续向负载供电的整机产品，而是成为一个小型的或者说局部的高度可靠、性能齐全、高度智能化的供电中心，能够对整个数据中心中的硬件设备、运行程序和数据及数据的传输途径进行全面的保护，为此对 UPS 的可靠性、安全性、可用性及适应性等方面均提出了较高的要求。

1. 数据中心供电环境对 UPS 的要求

作为电网与负载的中间环节，UPS 不仅要适应当地电网环境，而且在运行中不能对电网产生不良影响。根据研究表明，每台用电设备平均每月受到雷击、浪涌、低压、噪声或断电等电源问题侵害多达 120 次，如果不能及时地将处在电力故障状态下的系统安全关闭，那么系统将会全部瘫痪，系统的数据也将有丢失的危险。由于服务器、交换机、数据通信处理系统等设备对交流供电系统提出了不间断和高可靠性的要求，所以在 UPS 供电系统的工程设计中，应根据负载的特性、供电环境来选择 UPS 和设计其供电系统。UPS 的功能可概括为以下 3 点。

- ① 当市电断电时，不间断地向负载继续供电。
- ② 要具有全面改善供电质量的功能。
- ③ 当供电系统有故障时，能给负载以全面的保护。

UPS 对电网的适应能力是指 UPS 必须能在当地电网条件下正常运行，并且不对电网产生不良影响。这方面的性能指标包括以下几个。

- ① 允许电网电压变化的范围。
- ② UPS 输入功率因数。
- ③ UPS 输入电流的谐波成分。
- ④ 允许电网电压频率变化的范围。
- ⑤ 允许电网的不平衡度（三相）和波形失真度。

上面的第①、④、⑤项是要求 UPS 能适应电网环境，第②、③项则要求 UPS 不干扰和破坏电网。一台 UPS 对电网的适应能力主要指电网电压变化的范围、频率变化范围、波形失真和各种干扰情况下的运行能力。根据我国电网的情况，允许电网电压变化的范围一般应做到 $\pm 25\%$ ，而且我国电网电压频率也存在着不稳定的因素，UPS 必须在 $50\text{Hz} \pm 5\%$ 范围内能正常运行。特别是 UPS 输入端供电变压器的波形畸变和干扰也是很复杂的，为此 UPS 的输入端要有较强的滤波和抗干扰功能。

UPS 对电网环境适应的能力还包括与柴油发电机组配置时的适应能力，要考查的性能指标有输入电压允许变化范围、输入功率因数和 UPS 双向抗干扰能力。输入电压允许变化范围小时，会使 UPS 频繁进入蓄电池供电状态。输入功率因数小时，意味着输入存在较大的非线性电流成分，这不仅会破坏电网环境，还会导致供电设备及传输的容量增大，浪费电能。双向抗干扰能力包括能抑制电网中存在的各种干扰和反向对电网形成的干扰。

2. 绿色 UPS 供电系统的三大要素

在巨大的市场需求驱动下，数据中心的建设正以前所未有的速度蓬勃发展，而能源消耗的增加和能源价格的上升，则是目前所有数据中心运营必须面临的挑战。作为数据中心的基础能源设施，UPS 供电系统的正确选择，对构建一个绿色数据中心起着至关重要的作用。

(1) 输入功率因数

输入功率因数是电力系统的一个重要的技术指标，是衡量电气设备利用率高低的一个指标。UPS 输入功率因数是畸变因子和相移因子的乘积。因此，输入功率因数的改善往往与输入谐波畸变的治理同时进行。

UPS 对负载来说是电源设备，但从电网侧来看，UPS 则是电网的一个负载，其输入功率因数的大小会对 UPS 电源侧的变压器、柴油发电机、保护开关、输入线缆的选型产生直接影响。输入功率因数的增大，减小了供电线路中的电流，减小了供电系统中电气设备（如变压器、保护装置、导线等）的容量，所以不但减小了系统的无功损耗，而且减少了设备的投资费用，节约了电力资源。

一台 UPS 的输入功率因数取决于其所采用的整流技术，不同的整流技术体现出不同的输入功率因数，而且其特性也不尽相同。目前 UPS 的整流技术大体上可以分为两种：一种是绝缘栅双极型晶体管（IGBT）高频整流，另一种是晶闸管整流。IGBT 高频整流通过高频调制可以准确跟踪输入电压、电流的波形和相位，因而具有非常好的输入特性，通常输入功率因数为 0.99，输入电流总谐波畸变率（THDi）小于 3%，而且输入特性在各种工况下变化很小。晶闸管整流属于工频整流，如 6 脉冲整流和 12 脉冲整流，其输入特性随工况的不同会有较大的改变。其主要影响表现在两个方面：①负载率越高输入功率因数越大；②蓄电池充电对输入功率因数有影响。

晶闸管整流时，输入功率因数的相移因子 $\cos\varphi$ 与整流后的直流电压与输入交流电压的比值成正比。当直流母线电压较高时，UPS 输入功率因数就比较大；当直流母线电压较低时，UPS 输入功率因数就比较小。当蓄电池放电时，因放电后蓄电池端电压很低，UPS 必须调低其直流母线的电压，以便将蓄电池充电电流控制在允许的范围之内，其结果是致使 UPS 输入功率因数减小非常多。而当蓄电池充电时，UPS 输入功率是负载功率和蓄电池充电功率的总和，这是 UPS 输入功率因数最大的时候。这将直接影响 UPS 电源侧配电设备的选型。

综上所述,考核一台 UPS 输入功率因数的优劣,应该关注以下两个方面。

① 常用负载率下的输入功率因数。例如,60%~80%负载率时的输入功率因数比100%负载率时的输入功率因数更具有参考价值。

② 如果 UPS 采用晶闸管整流,那么蓄电池充电时的输入功率因数是电源侧配电及保护设备的重要选型参数。

(2) 输入电流总谐波畸变率

谐波产生的根本原因是非线性负载从电网吸收非正弦电流,结果使其波形产生畸变。谐波是电力系统的噪声污染,除造成系统干扰外,也对系统的节能减耗造成很大影响。例如,谐波电流不仅被线缆阻抗吸收造成电能损失,而且高频率的谐波加重线缆的集肤效应,进而使铜损增加;严重时会使温度升高,造成导线绝缘损坏。在有谐波的电网中,高次谐波电流直接反馈给发电机,在发电机的绕组中引起感应电流,使之发热产生损耗,导致输出功率降低。同时谐波电流造成设备自身和电网的附加无功电能,影响设备运行及寿命。

目前采用的 UPS 输入谐波抑制技术有:无源滤波、有源滤波、12 脉冲整流、IGBT 整流技术等。每种滤波技术各有其特点。

① 无源滤波。无源滤波采用电感和电容组成谐振滤波器吸收某些特定的谐波电流,常用的有 5、7 次谐振滤波器,5、7、11、13 次谐振滤波器等。其优点是简单、控制方式较易实现、成本低、技术成熟。其缺点是只能抑制固定频率的谐波,其滤波特性受系统阻抗和负载率影响,易与系统发生并联谐振导致谐波放大而使 LC 滤波器因过载而烧毁。

② 有源滤波。有源滤波应用电流反馈技术使输入端电流波形跟踪交流输入电压波形,由补偿装置产生一个与谐波电流大小相等而极性相反的补偿电流,从而抑制电网中的谐波电流含量。其优点是可动态跟踪负载并滤除系统中的谐波,不会给系统带来谐振,可补偿各次谐波,滤波范围大。其缺点是自身会消耗 3%~5% 的系统能量。

③ 12 脉冲整流。12 脉冲整流采用移相变压器组成 6 脉冲倍数的整流器,减少谐波电流总量。其优点是不需要滤波电容,对备用发电机的调节无影响。最新技术的 12 脉冲整流可以将谐波电流抑制至 4.5%。其缺点是输入功率因数比有源滤波稍小,只能达到 0.93 左右。

④ 12 脉冲+11 次滤波。12 脉冲+11 次滤波是目前较为流行的一种配置方法,可以将输入功率因数增大至 0.95 左右。但同时也增加了滤波电容这一故障易发点。

⑤ IGBT 整流。IGBT 数字化整流将整流与输入功率因数校正功能相结合,利用 IGBT 的优良特性,通过 DSP 控制技术,达到输入电压、电流完全同相位正弦化,从而达到消除谐波的目的。其优点是体积、重量小,输入功率因数接近 1,总谐波含量小于 3%,整机效率高。其缺点是器件要求较高,控制技术复杂。

谐波治理中应该关注的两个问题如下。

① 系统谐波治理与系统效率的平衡问题。滤波装置的加入不可避免地带来效率的损失,例如,一台 UPS 增加无源滤波器后,其效率下降 0.5%~1%,增加有源滤波器后效率下降 3%~5%。因此,有必要考虑增加滤波器后,谐波抑制带来的益处是否可以补偿 UPS 效率下降的后果,对小总谐波畸变率的过度片面追求可能最终造成资源的浪费。

② THDi 指标的正确使用。通常 UPS 厂家给出的 THDi 指标是在满载时得到的,UPS 的输入电流总谐波畸变率会随负载率的降低而增大。对于一个电源系统来说,UPS 谐波电流是否满足系统的要求,取决于其最大谐波电流的绝对值,而不是相对值。在关注不同负载率下

的 THDi 的同时,也应该关注不同负载率下谐波电流的绝对值。例如,UPS 系统要求满载时 THDi 小于 5% 是合理的,但如果同时要求在 30% 负载时,THDi 也小于 5%,则是不科学、不合理的。

(3) 效率

UPS 是常年不间断运行设备,所以 UPS 的整机效率是直接节能的因素。效率每提高一个百分点,每年运行下来的节能效果就非常可观。以一台 400kVA 的 UPS 运行一年为例,若 UPS 系统效率为 0.94,则每年耗电量为 $400\text{kVA} \times 0.9$ (负载功率因数) $\times 24$ (h) $\times 365$ (d) / $0.94 = 3354894\text{kWh}$ 。

若 UPS 系统效率为 0.93,则每年耗电量为 $400\text{kVA} \times 0.9$ (负载功率因数) $\times 24$ (h) $\times 365$ (d) / $0.93 = 3390967\text{kWh}$ 。

效率每提高 1%,UPS 每年节电为 $3390967 - 3354894 = 36073\text{kWh}$ 。同时,若以 3:1 的能效比来考虑,则空调系统会因此节电 $36073/3 = 12024\text{kWh}$ 。

① UPS 的效率与 UPS 的负载率紧密相关。当负载率为 50% ~ 75% 时,可获得最高的系统效率;当负载率低于 40% 时,UPS 的效率有较大的下降。因此,根据实际负载的大小,合理选择 UPS 的容量是 UPS 系统节能的首要工作。

② 关注系统效率。UPS 系统效率,不仅指 UPS 主机本身的效率,还应该包括其辅助设备,如为抑制谐波而增加的输入滤波装置、为形成独立的供电系统而增加的隔离变压器等。这些辅助设备均有能耗,应计入系统效率。

各种 UPS 由于拓扑结构不同或采用的技术不同,在配置上有很大的差别。例如,采用 IGBT 整流的 UPS,不需要增加任何滤波装置,就可满足系统对输入功率因数和输入电流总谐波畸变率的要求。而 6 脉冲整流的 UPS 必须增加有源或无源滤波器,才能满足系统的要求。因此,不能片面地比较这两台 UPS 主机的效率,而应该将滤波器对效率的影响计入后进行比较。同理,在系统需要隔离时,应该将高频机(无输出变压器)的效率减去变压器的能耗后,再与工频机(有输出变压器)的效率比较。

③ UPS 系统节能管理功能。除了 UPS 电源本身的效率外,另外一个影响 UPS 系统运行效率的因素是 UPS 是否具有节能管理功能。

增加系统的冗余度,可提高系统可靠性;而冗余度的增加使系统的负载率下降,从而导致 UPS 系统效率的下降。目前大型数据中心采用的 TIER4 标准设计的双总线 3+1 或 4+1 UPS 供电系统,其系统效率下降严重,是今后亟待解决的问题。

最为行之有效的解决方案是采用 UPS 休眠功能,类似的功能已经在通信电源中成功应用多年。具有休眠功能的 UPS 系统,可以根据负载的大小,自动调节系统中 UPS 运行的数量,在保证可靠性的前提下,让多余的 UPS 进入休眠状态,从而提高系统的负载率,达到提高系统运行效率的目的。

例如,一套按照 TIER4 标准设计、采用(4+1)500kVA UPS 并联的双总线系统。整个系统合理负载容量为(60% ~ 80%) $\times 2000\text{kVA}$,按较大负载容量 80% 计算,系统负载容量为 1600kVA,则正常运行时,每个单系统的负载容量为 800kVA。此时,每个单系统实际运行在 2+3 冗余模式下。单系统负载率为 $800\text{kVA}/5 \times 500\text{kVA} = 32\%$ 。此时,UPS 效率约为 90%,系统总损耗为 $1600\text{kVA} \times 0.9$ (负载功率因数) $\times (1 - 90\%) = 144\text{kW}$ 。启动休眠功能后,每个单系统中两台 UPS 进入休眠,单系统成为 2+1,可靠性符合设计要求。单系统负

载率为 $800\text{kVA}/3 \times 500\text{kVA} = 53\%$ 。此时, UPS 效率为 93.5% , 系统总损耗为 $1600\text{kVA} \times 0.9$ (负载功率因数) $\times (1 - 93.5\%) = 93.6\text{kW}$ 。同比节能 35% 。

绿色 UPS 意味着节能, 环境污染小, 占地面积小, 投资少, 运行费用低。其中, UPS 的输入功率因数、输入电流总谐波畸变率、效率, 作为关键的“绿色”指标, 更应在 UPS 及其系统设计时予以正确理解和慎重选择。

早期应用于数据中心的 UPS 供电方案多为单机方案或 UPS 串联方案, 均存在输出单点故障瓶颈问题。数据中心随着业务的飞速发展, 对业务的重要性和可用性要求逐渐提高。过去对供电系统的可用性要求为 $99.9\% \sim 99.999\%$, 采用的方案为单机 UPS 工作、串联 UPS 工作、 $N+1$ 并联工作。对于 $99.9\% \sim 99.999\%$ 的可用性, 年平均的不可用时间为 $8.76\text{h} \sim 5.3\text{min}$, 显然这种故障时间不能达到当前 IDC 等数据中心的要求。为了提高数据中心的可用性, 必须提高 UPS 供电的可靠性, 彻底提高 UPS 供电系统的可用性。

美国 IDC 的研究表明, 在 UPS 供电中, 影响供电可靠性的最大因素在于输出侧的配电系统, 包括开关跳闸、熔丝烧毁、电路短路等供电回路故障: 79% 为 UPS 输出与负载之间的供电线路上的故障 (熔丝烧毁、断路器跳闸、负载短路、开路等故障), 11% 来源于 UPS 和蓄电池, 其他故障占 10% 。

现如今, 为了解决配电回路的故障, 就要将服务器等设备的电源配置成 $N+X$ 冗余电源系统, 如采用 $1+1$ 电源模块。服务器的电源冗余一般配备双份或多份支持热插拔的电源。正常工作时, 每个电源平均输出一部分功率, 从而使每台电源都处于轻松的负荷状态, 这样有利于电源稳定工作。若其中一台发生故障, 则另外几台就会在没有任何影响的情况下接替工作, 并通过灯光或声音报警。此时, 可以在不关闭系统的前提下更换损坏的电源, 所以采用热插拔冗余电源可以避免系统因电源损坏而产生的停机现象。

为配合服务器电源的配置, 最佳数据中心的供电方案应该采用双路 UPS 组成的双母线供电系统, 彻底解决供电回路单点故障瓶颈。显然, 这种双路 UPS 组成的双母线供电系统, 与服务器等设备的双路冗余电源实现最佳配合, 同时彻底解决了供电的 79% 的故障概率问题。此外, 双路 UPS 组成的双母线供电系统, 实现了系统可以在线扩容、在线维护等要求。

对于网络交换机等单电源设备, 采用静态转换开关 (STS) 供电, 当一路 UPS 或回路发生故障时, STS 无缝切换到另外一路 UPS 供电回路上, 同样为单电源设备提供了双路的电源供应。在大型数据中心的, 为确保可用性要求达到 99.99999% , 采用从市电输入到负载输入之间所有回路/设备的完全冗余工作。

UPS 供电系统的方案设计应围绕提高系统的安全性, 供电一体化设计结构合理并具有扩充功能。最佳数据中心的供电方案应该采用双路 UPS 组成的双母线供电系统, 彻底解决供电回路单点故障瓶颈, 能适用于绝大多数数据中心。



1.1.4 数据中心供电模式

1. 传统的数据中心 UPS 供电系统解决方案

传统的数据中心中的设备要求交流输入电源, 一般是与市电电源的电压和频率相同的电源, 即 220V 、 50Hz 的单相交流电源。传统的数据中心的电源系统是 UPS 系统, UPS 系统一般由整流充电器、逆变器、蓄电池和静态开关等组成。当市电正常时, 市电经整流充电器变

换为直流电供给逆变器，同时给蓄电池充电，逆变器将直流电变换为交流电供给负载。当 UPS 本身发生故障时，负载可经静态开关转换为旁路市电供电；当市电长时间停电时，由备用发电机组供电。

虽然数据中心的设备是单相供电的，但功率越来越大。由于单相 UPS 功率受到限制，解决的方法是用三相 UPS 供电，功率一般平均分到三相上，同时进行 UPS 并机，解决其供电可靠性的问题。由于 UPS 最终通过逆变换供电给数据设备，如果逆变与转换部分出现故障，那么蓄电池不能直接给数据设备供电，会导致数据设备中断。

(1) 串联热备份 UPS 供电方式

串联热备份 UPS 供电方式消除了单点故障，实现简单，但是在同一时间只有一台 UPS 带载，所以存在超载能力差及主、备机老化不均等问题，目前已经较少采用。串联热备份 UPS 供电系统图如图 1-1 所示。

(2) 冗余并联 UPS 供电方式

冗余并联 UPS 供电方式的最大好处是可以负载均分，其中任意一台 UPS 发生故障，则被切离，UPS 系统不用进行任何转换，仍可工作在线模式。这种供电方式可以根据负载容量，通过增加 UPS 的方式实现系统容量扩充。冗余并联 UPS 供电系统图如图 1-2 所示。

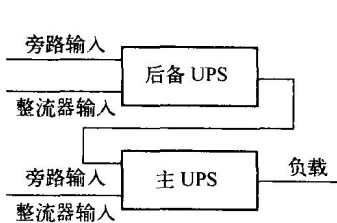


图 1-1 串联热备份 UPS 供电系统图

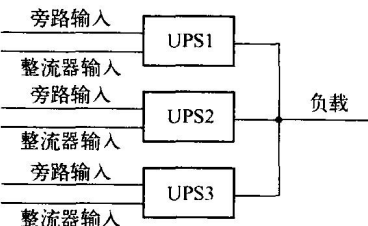


图 1-2 冗余并联 UPS 供电系统图

(3) 双总线 UPS 供电方式

双总线 UPS 供电方式的最大特点是同时提供两路互不影响的供电母线，分别提供给双电源负载，或者通过 STS 再提供给单电源负载。这种供电方式也很好地消除了单点故障，但限于供电方案中又增加了 LBS（同步控制）和 STS（双路转换），所以也增加了故障点。双总线 UPS 供电系统图如图 1-3 所示。

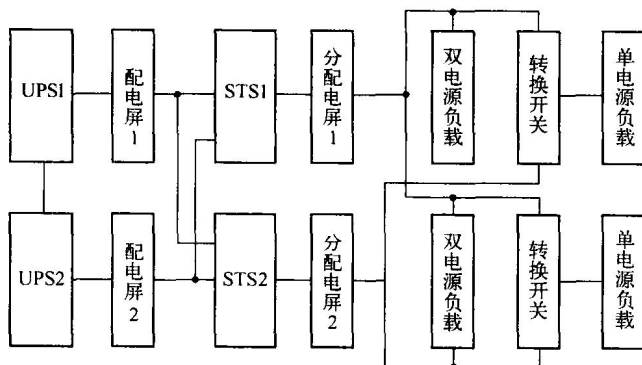


图 1-3 双总线 UPS 供电系统图

2. 公用 -48V 母线的混合系统解决方案

公用 -48V 母线的混合电源系统的结构特点是直流负载和交流负载的电源系统都采用 -48V 母线作为输入电源。当市电或整流充电器发生故障时，由于蓄电池与输出母排是并联的，所以 -48V 母线电源是不间断的。直流负载由 -48V 母线直接供电，交流负载经逆变器供电，即用 -48V 直流电源供电的逆变器代替了 UPS。公用 -48V 母线的混合系统图如图 1-4 所示。

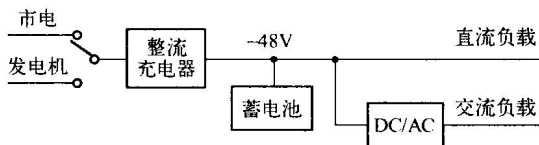


图 1-4 公用 -48V 母线的混合系统图

混合系统解决方案技术成熟，-48V 电源是真正的不间断电源，其输出纯净，所以系统整体稳定性有所提高，不易拉弧，安全性高。混合系统解决方案的缺点是在交流负载的电源链中增加了电源变换的次数，且电压低，电流大，增加了损耗，降低了系统效率。这种电源系统结构仅适用于交流负载为中、小功率的情况。

3. 整流型 rAC 高压供电系统解决方案

整流型 rAC 高压供电系统类似传统的 -48V 直流电源系统中的直流母线由经过整流的母线替代，实际上是脉动的直流。系统由整流桥、高电压蓄电池、蓄电池开关、充电机等组成。这种 rAC 高压供电系统的输入谐波电流抑制和功率因数需要补偿，必须在 rAC 母线上并联谐波抑制器。整流型 rAC 高压供电系统图如图 1-5 所示。

rAC 高压供电解决方案在整个供电电路中只有一个变换级，损耗小，效率高，蓄电池充电机只用于给蓄电池离线充电，所以容量较小，成本低。rAC 高压供电解决方案电压高，安全标准要求高，采用单体蓄电池数量较多，要求进行更严格的蓄电池管理。

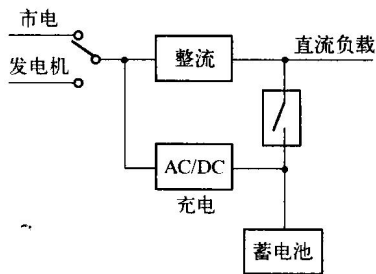


图 1-5 整流型 rAC 高压供电系统图

4. 高压直流供电系统解决方案

数据中心设备内部电源状况是计算机主机、显示器、打印机等电气设备的内部电源都是开关电源，将输入的交流 220V 先整流、滤波成直流 300V 后，再通过电源开关管和开关变压器降压、稳压成低压，为各部分提供电源。一般交流电压为 110 ~ 250V，通过整流、滤波后的直流电压为 150 ~ 340V。因此，给这些设备输入一个 150 ~ 340V 的直流电压，设备是可以正常工作的。额定电压在 228 ~ 280V（后备 12V 蓄电池 19 只或 20 只）范围内的直流电通过桥式整流电路、滤波后，仍是直流 228 ~ 280V，在 150 ~ 340V 之间，所以开关电源仍能正常工作。高压直流供电系统图如图 1-6 所示。