

“双碳”目标下的数据中心 低压配电系统供电方案选择

文/张 震 黄伟男
中国民航信息网络股份有限公司

数据中心能耗主要消耗在低压配电系统，如何实现数据中心低压系统的低耗、高效运行成为数据中心建设和运维管理的难题。通过对数据中心低压系统供电架构和供电方案的研究，分析了低压配电系统能耗的本质，并从供电方案角度对高效运行问题进行了讨论，给出了数据中心低压配电系统供电方案选择的思路及方法。

2020年9月，我国在联合国大会首次提出“30·60”双碳承诺后，“十四五”即成为我国实现碳达峰的关键期和窗口期。为深入贯彻落实党中央、国务院关于碳达峰、碳中和的重大战略决策，扎实推进碳达峰行动，2021年10月24日，国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》明确提出：要加强数据中心等新型基础设施节能降碳，并指出要优化新型基础设施用能结构，采用直流供电、分布式储能及光伏+储能等模式。

数据中心作为能耗大户，向绿色、节能转型势在必行。近年来相关政府部门也陆续发布文件和指导意见，提出进一步降低数据中心电能利用效率（Power Usage Effectiveness, PUE）的要求。综合来看，新建数据中心的PUE应小于1.3，改建数据中心的PUE应小于1.4，对于PUE高于1.4的数据中心将逐步关停。

另一方面，自2021年以来，受新冠疫情影响，国内煤炭价格不断上涨，导致五大发电集团旗下的五家核心上市公司亏损严重。为此，国家持续深化燃煤发电上网电价市场化改革，有序放开全部燃煤发电电量上网电价。北京市发展改革委发布的《关于调整本市目录销售电价有关事项的通知》中已取消本市工商业用电（包括一般工商业和大工业用

电）目录销售电价。以上政策间接造成了数据中心的运营成本升高。以北京某数据中心为例，售电改革前电价约为0.72元/kW·h，改革后电价约为0.84元/kW·h，电费改革后年成本增加近1 560万元。

面对节能减排政策和用电成本的双重压力，如何实现绿色、低耗化转型已成为数据中心面临的普遍难题。面对绿色发展问题，数据中心行业主要从发电侧实现，如采购绿电、绿证或新建绿色电力（比如分布式光伏发电或风力发电）等。在低耗方面，目前主要做法是在用电侧采取节能供电方案和加强设备运行优化管理等降耗措施，降低设备运行能耗，从而实现节能。对上述案例数据中心，在冬季制冷系统采用自然冷却下，当PUE为1.23时，供电负荷PLF为0.124，而其中UPS等供电环节设备能耗占比达8.6%，在整个数据中心中能耗占比处于第一位。

本文针对数据中心供电链路中的电能损耗及供电方案的选择展开研究，首先分析电能损耗产生的根本原因，并从供电架构角度解释其内在原因；而后针对上述问题，从低压供电系统角度提出了解决思路，分别介绍了基于传统供电方案的改进措施，以及两种新型低压供电方案在节能及其他方面的优势，为数据中心的改造、建设工作提供思路与参考意见。

供电损耗原因分析

数据中心多使用中压-变压器-UPS-低压的传统供电方案。供电链路中涉及的配电柜、电缆、变压器的损耗相对较低。而UPS，由于其使用的大功率电力电子器件的效率特性，在供电过程中产生了较高的电能损耗。根据不同厂家同容量UPS效率对比曲线（见图1）可知：①UPS运行负载率在20%以上才能有较高的效率，达90%以上；②UPS本身的设计也会导致不同的运行效率。因此，针对降低供电链路的电能损耗问题有两个解决思路：一是提高UPS的工作负载率；二是降低UPS本身的损耗。

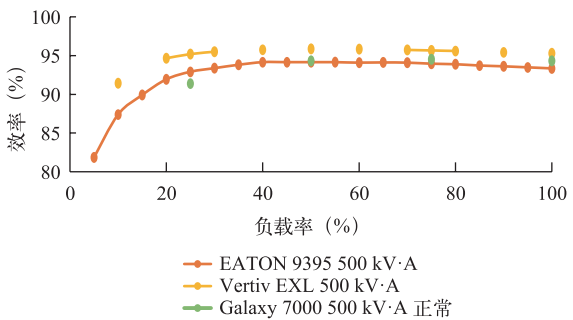


图1 不同厂家同容量UPS效率对比

UPS的工作负载率受到供电系统的制约，数据中心UPS供电系统的设计主要按照GB 50174—2017《数据中心设计规范》和ANSI/TIA-942-B《数据中心电信基础设施标准》进行。《数据中心设计规范》将数据中心分为A级、B级和C级三个等级，具体划分见表1。A级为容错系统，可靠性和可用性等级最高；B级为冗余系统，可靠性和可用性等级居中；C级为满足基本需要，可靠性和可用性等级最低。TIA-942将数据中心分为Tier1/Tier2/Tier3/Tier4，其中Tier4要求双系统或容错设计；Tier3要求可在线维护，冗余设计；Tier2冗余设计；Tier1无冗余设计。

表1 数据中心等级划分

数据中心等级	数据中心等级划分依据	配置要求
A级	电子信息系统运行中断将造成重大的经济损失，电子信息系统运行中断将造成公共场所秩序严重混乱	容错配置
B级	电子信息系统运行中断将造成较大的经济损失，电子信息系统运行中断将造成公共场所秩序混乱	冗余配置
C级	不属于A级或B级的数据中心应为C级	基本要求配置

国内数据中心一般按B级或A级进行设计，其供电架构要求分别为N+1和2N供电架构，典型供电架构如图2所示。《数据中心设计规范》要求UPS系统在设计时按需求容量的1.2倍进行设计。以数据中心常见的N=3的UPS并机系统为例，N+1系统最大负载率为62.5%，2N系统最大负载率为41.6%。在数据中心的投产初期，IT设备还没有完成上架，在UPS全部开启的情况下，尤其在负载率低于20%时，UPS效率会低于90%。以航信数据中心为例，在UPS不开启节能模式下，尽管已投产5年，单套UPS系统最大负载率仅为38.8%，最大效率仅为92.5%，UPS系统最小负载率为7.5%，效率为73.7%。

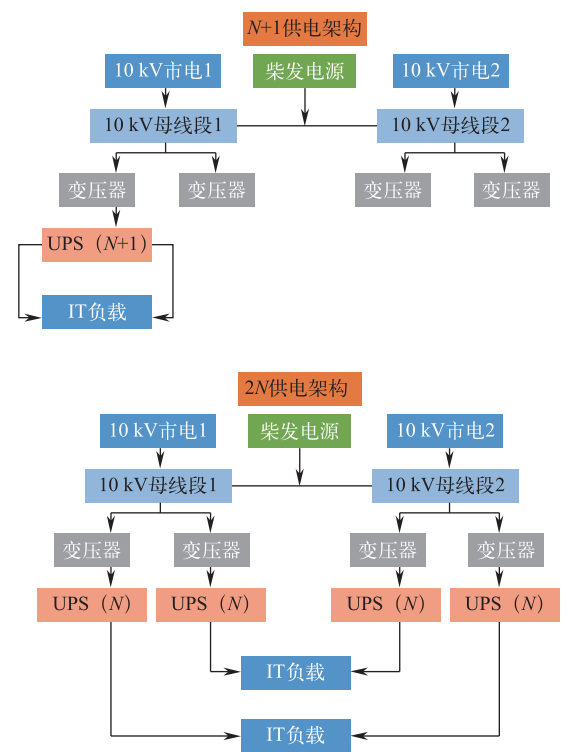


图2 数据中心典型供电架构

而对于2N架构的UPS，即使机房模块满载，负载率也不会高于50%。因此，从供电架构角度而言，低负载率问题很难得到解决。

数据中心低压供电方案分析

在供电架构无法改变的情况下，部分设备厂商提出了基于设备角度的解决思路，如施耐德、伊顿和维谛等，在保持传统UPS供电技术方案的前提下，从UPS设备本身来降低能耗。主要手段有两种：一种

是优化UPS自身设计，提高其输出效率；另一种是从能量管理角度出发，使用休眠、轮训和旁路供电等节能模式，使UPS系统保持高负载率工作。

此外，在国内以互联网企业（如阿里、百度、腾讯等）和电信运营商为代表的用户，联合设备厂家一起推广，对低压供电技术方案提出了改进措施，放弃了传统架构中的UPS，采用直流供电，减少了电能变换环节产生的损耗。此类典型的供电方案为高压直流供电技术和巴拿马供电技术。下面针对传统UPS供电、高压直流供电和巴拿马供电三种典型供电技术方案展开分析。

1. 传统UPS供电技术方案的改进

传统UPS供电技术的演进主要体现在降低能耗、方便维护、减少设备占地空间及提高系统安全性等方面。技术发展主要经历了工频机、高频机、类模块化机和模块化机四个阶段，现主要以类模块化机和模块化机为主。从工频机到高频机，去掉了UPS内部的变压器，同时将整流从采用晶闸管改为采用更加先进的IGBT控制技术，降低了IGBT开关损耗。由于IGBT控制技术的应用，取消了隔离变压器，在降低设备成本的同时，没有了变压器损耗，使效率从85%~92%提升到87%~95%。高频机普遍具有节能模式，但部分高频机节能模式无法给蓄电池持续充电。

类模块化机的本质还是高频机，一般采用两个低功率的高频机并联，并没有真正实现模块化机的热插拔功能。虽然类模块化机的效率并不一定高于高频机，但在低载情况下可以对类模块化机的一个模块进行休眠，并且可以保障蓄电池的持续供电。同时，类模块化机在故障维修时只需替换下故障的模块，利于维护。部分类模块化机实现了风扇的变频控制，也进一步降低了能耗。

模块化机最大的优点是通过多个模块的并联实现了大容量UPS系统，这使UPS系统可以通过更精确的负载率来进行模块休眠，同时，由于支持热插拔工作，使UPS可以在线维护，并大大节省维护时间。但现阶段UPS单模块功率普遍只做到了60 kV·A，最高的是华为5000-H系列，可以做到100 kV·A。大容量模块化UPS由于并联模块多，并机控制难度大，导致模块化UPS成本较高。同时模块化UPS属于较新的技术，其可靠性还待进一步验证。

通过市场调研，从效率、节能模式、可维护性、稳定性、发展趋势、占地空间及采购成本七个维度对不同类型UPS功能进行对比，结果见表2。通过对比可知，工频机已基本不符合当下的发展趋势，而其他三种类型的UPS各有特点，且普遍具有节能模式，可以在低负载率的情况下保证高效运行。在具体应用时应结合其他需求进行综合分析选择。

表2 不同类型UPS功能对比

UPS类型	效率	节能模式	可维护性	安全性	发展趋势	占地空间	采购成本
工频机	较低	不具有	差	高	已基本淘汰	大	高
高频机	高	具有	差	高	逐步减少	较大	中
类模块化机	高	具有	快速更换	高	高市场占有率	较小	中
模块化机	高	具有	热插拔	待进一步验证	厂家主推	较小	较高

2. 高压直流供电技术方案

中国电信和中国移动基于传统电信行业48 V供电系统，提出了高压（240 V/336 V）直流供电技术（HVDC）。该技术采用模块化设计方案，将传统UPS系统的变换从“AC/DC/AC”简化为“AC/DC”，采用直流供电方式直接为IT设备供电，IT设备内部电源模块化设计省去了整流和滤波部分，传统UPS供电和HVDC供电示意图如图3所示。

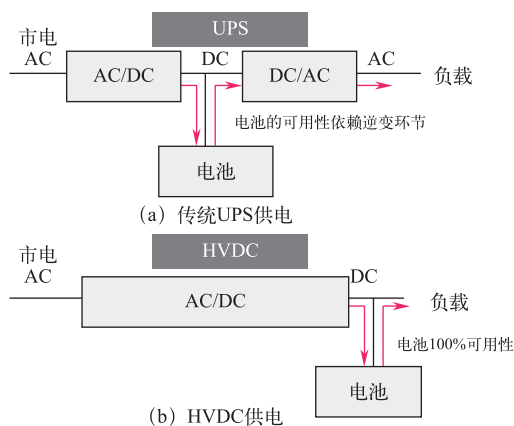


图3 传统UPS供电和HVDC供电示意图

从2007年至今，经过15年的发展探索，HVDC入编《国家绿色数据中心先进适用技术产品目录（2020）》并得到推广。2020年GB/T 38833—

2020《信息通信用240 V/336 V直流供电系统技术要求和试验方法》颁布实施,为高压直流供电技术的发展提供了技术指导。该技术在国内外一些互联网新建数据中心中已开始应用,每年可节能8%。

高压直流供电技术作为一种新型供电技术,在提高可靠性、降低能耗和节省运维投资的同时,还有以下五方面的优点:

- 1) 电池不依赖于逆变器,可用性更高。
- 2) HVDC主要为国产产品,且没有逆变环节,采购成本约降低25%。
- 3) 模块化设计,可自主维护,若买MA,成本降低70%以上(以 $4 \times 600\text{UPS}$ 为例)。
- 4) 应用案例众多,如BAT、三大运营商、工商银行、浦发银行和中石化等。
- 5) 厂家众多,如中恒电气、维帝、艾默生和中达电通等。

作为一种新的供电技术, HVDC在使用中需要

充分考虑后端IT设备的适应性。对于改造项目,既要考虑后端断路器及配电柜是否满足要求,也需要考虑后端设备的适应性和相关设备是否满足其安全性、可靠性和可扩展性等, HVDC在这方面具有明显的优势。

3. 巴拿马供电技术方案

巴拿马供电技术方案(见图4)是一种新型的高压直流供电技术方案,它裁弯取直,减少中间环节,达到更高的效率。巴拿马供电技术方案与高压直流供电技术方案相比,将变压器、低压配电柜和HVDC系统高度集成,具备更高的可用性、高效率、低成本、模块化、维护方便和占地空间小等优势,为数据中心提供了一种革命性的供电方案。

从供电架构来看,巴拿马供电技术方案将传统的变压器改为移相变压器,将高压直流换为调压整流,如图5所示。

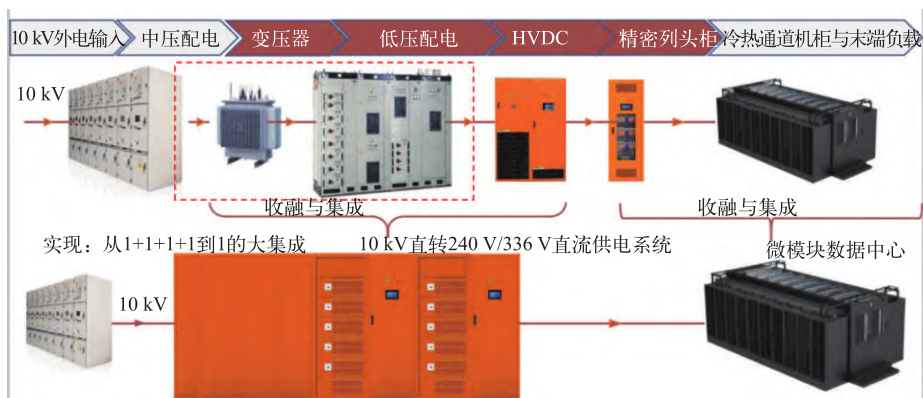


图4 巴拿马供电技术方案

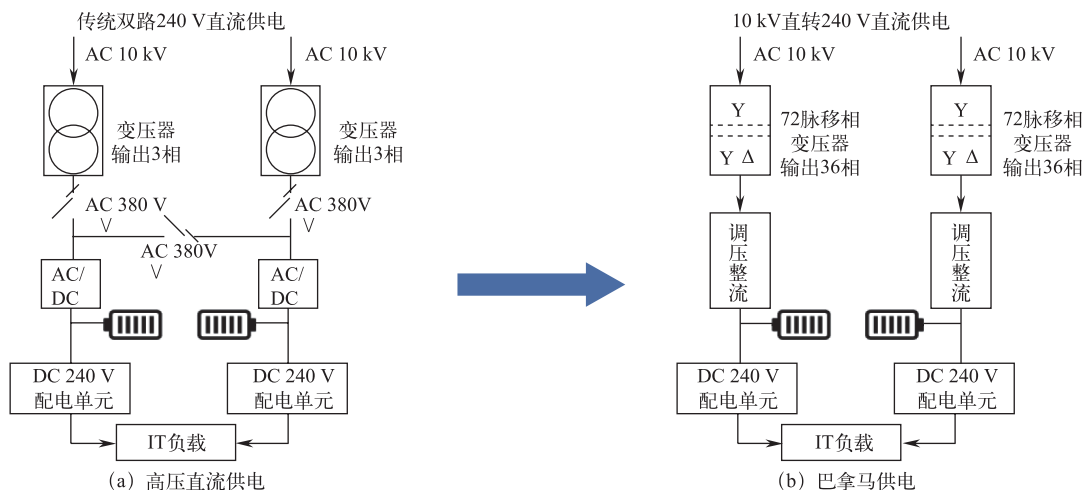


图5 高压直流供电与巴拿马供电结构对比

巴拿马供电技术方案具有如下优点：

1) 占地面积小。一体化设计，以2 500 kV·A变压器后端配电系统为例，传统设备占地面积约300 m²，而巴拿马电源所需占地面积约110 m²，占地面积节约60%。

2) 系统效率高。效率可达97%。

3) 采购成本低。以2 500 kV·A变压器后端配电系统为例，所有设备采购成本约403万元，巴拿马电源采购成本约285万元，采购成本约降低29%。

4) 自维护。由于采用模块化设计，可自主维护，MA成本下降约80%（以4×600 kV·A为例）。

但作为一个新技术，巴拿马供电技术方案也同样存在几方面的问题：

1) IT设备需要支持直流供电方式。

2) 变压器需要定制，成本比传统变压器高15%~20%。

3) 产品投产时间过短（2018年投产），技术成熟度待时间验证。

4) 移相变压器与传统变压器维护方式不同，需进行技术研究。

5) 当前应用案例过少，只有阿里、腾讯和联通等公司应用。

6) 方案须报供电局审批。

数据中心低压供电方案选择建议

在“双碳”目标下，数据中心低压供电方案的选择是一个复杂的工作。建议遵循如下的选择思路：首先根据业务类型确认数据中心建设等级；再根据建设等级选择合适的供电架构；最后选择合适的低压供电技术方案。

关于建设等级选择：严格按照GB 50174—2017《数据中心设计规范》或TIA-942-B《数据中心电信基础设施标准》要求进行选择。

(1) 关于供电架构选择

1) A级数据中心可以选择2N供电架构或“UPS (N+1) +市电”供电架构。2N供电架构具有更好的维护便利性和供电稳定性，“UPS (N+1) +市电”供电架构尽管可以带来更低的能耗，但需考虑市电的稳定性，且UPS系统维护难度较大。

2) B级数据中心选择UPS (N+1) 供电架构。

(2) 关于供电技术方案选择

在供电架构确定的情况下，根据实际情况选择供电技术方案。

更换类。对于UPS生命周期末期的自然更换，建议维持传统供电方案，尽可能选择类模块化和模块化UPS，并综合考虑能耗、节能运行模式和安全要求等确定最终型号。

新建类。应从以下几个方面考虑：

1) 在IT设备不确定情况下，建议外包类机房建设时采用传统变压器，后期可根据客户需求灵活选择传统UPS供电或高压直流供电。

2) 在IT设备确认情况下。①只支持交流供电，应从全生命周期的角度，统筹考虑建设成本和运维成本，选择最终的技术方案，在选择UPS时，要充分考虑UPS设备在不同负载率下的能耗问题，如是否具有节能模式，节能模式下是否能继续对蓄电池进行浮充等；②支持直流供电，优先考虑HVDC供电方案，可以节约采购成本和降低运维成本。对于供电局批准的情况下，可以考虑采用巴拿马供电方案，但对可靠性要求高的数据中心的两路供电不建议同时采用。

3) 对于金融、国家关键基础设施等以供电可靠性为核心需求的数据中心，应选择传统UPS供电技术方案，但为了满足国标对PUE的要求，建议选择高效且具有节能模式的类模块化或模块化UPS，更多利用UPS的节能模式来降低能耗。

结束语

本文针对“双碳”背景下的数据中心低压配电系统供电链路中的电能损耗及供电方案的选择问题展开研究，并通过分析给出了数据中心低压配电系统供电方案选择的思路方法，为数据中心的改造、建设工作提供参考。EA

参考文献

- [1] 王大晓，浦培林，刘彬，等．浅析智能照明系统在数据中心的应用[J]．电气应用，2021，40(11): 26-31.
- [2] 赵亮亮，高凤荣．适用于数据中心的多台并列直配柴油发电机的中性点接地及保护配置方案[J]．电气应用，2020，39(8): 60-65.