

数据中心电源系统智能休眠模式的应用与研究

邱 格, 叶晓剑, 李 震, 李金成, 周秋月

(中国移动通信集团设计院有限公司, 北京 100080)

摘要: 在数字化转型加速的背景下, 数据中心作为数字经济的核心基础设施, 进入规模化扩张与能效升级并行的新阶段。聚焦绿色低碳数据中心关键技术研究, 为应对数据中心电源系统中不间断电源、服务器电源等高频开关电源产品在轻载下的低效率、高谐波等行业痛点, 提出一种智能休眠模式, 通过精确的负载监控、智能化的负载分配以及合理的冗余设计, 确保系统稳定运行的同时, 有效提高数据中心电源系统运行效率。

关键词: 数据中心; 电源系统; 智能休眠模式

Application and research of intelligent sleep mode in data center power systems

QIU Ge, YE Xiaojian, LI Zhen, LI Jincheng, ZHOU Qiuyue

(China Mobile Communications Group Design Institute Co., Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract: Against the backdrop of accelerating digital transformation, data centers, as the core infrastructure of the digital economy, have entered a new phase of simultaneous large-scale expansion and energy efficiency upgrades. This paper focuses on the key technologies of green and low-carbon data centers. To address industry pain points such as low efficiency and high harmonics of uninterruptible power supplies, server power supplies, and other high-frequency switching power supply products under light loads in data center power systems, an intelligent sleep mode is proposed. Through precise load monitoring, intelligent load distribution, and reasonable redundancy design, the system ensures stable operation while effectively improving the efficiency of the data center power system.

Keywords: data center; power supply system; intelligent sleep mode

0 引言

随着大数据、云计算和物联网等技术的快速发展, 全社会数字化转型加速, 各类算力需求旺盛, 引发数据中心算力规模激增, 导致数据中心能耗与碳排放不断攀升。研究显示, 数据中心能耗占全球能耗的比例将从2015年的0.9%上升到2030年的8%^[1], 数据中心内供配电系统损耗占总体能耗接近10%。在“双碳”战略驱动下, 政府对数据中心、算力网络不断出台政

策, 其中关于绿色发展的要求愈加细致、指标愈加严格。工信部明确提出, 到2023年, 新建大型及以上数据中心电源利用效率(Power Usage Effectiveness, PUE)降低到1.3以下, 绿色低碳等级达到4A级以上; 2024年, 国务院在《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》中提出, 到2025年底, 新建及改扩建大型和超大型数据中心PUE降至1.25以内, 国家枢纽节点数据中心项目PUE不得高于1.2。因此, 用何种能源和技术适配数据中心的能源供应和低碳运行, 加快数据中

心向绿色节能方向迈进，成为全球数据中心可持续发展极其重要的问题^[2-4]。

为此，相关学者提出了数据中心电源系统高效节能方案。例如，文献[5]基于通信开关电源的效率曲线，通过划分特定的区域执行休眠逻辑，但控制精度与灵活性较差，同时缺少故障保护措施；文献[6]提出了在低负载率下数据中心UPS执行休眠模式的必要性，采用固定阈值作为进入和退出休眠的条件，会导致休眠模式的节能效率不高，适用性较差；文献[7]基于模块化多电平换流器（MMC）的结构特征，通过机器学习算法预测负载变化趋势，动态调整功率模块状态，优化响应时间，通过蒙特卡洛模拟量化休眠策略对系统可靠性的影响，平衡能耗降低与故障风险。

综上所述，目前对于数据中心电源系统智能休眠模式的研究仅限于不间断电源，于系统而言，能效优化空间受限，且控制理论与保护措施尚不完备。为此，本文以数据中心开关电源产品为出发点，分别针对服务器电源和模块化电源提出相应的休眠策略，具备完善的控制逻辑与故障隔离方案，能够有效提升数据中心电源系统的运行效率。

1 研究背景

1.1 数据中心负荷特性

在现代化数据中心运营体系中，IT设备

（包括服务器、存储设备、交换机等）需要保证 7×24 h不间断工作，随着数字化业务的潮汐式发展（如电商平台的促销周期、金融系统的交易时段、云计算平台的弹性负载等），系统负载呈现典型的正弦波形动态特征：根据IDC《全球数据中心能源效率白皮书》统计，典型企业数据中心日均负载率在15%~85%区间波动，其中每日0:00—6:00时段（对应非工作时区或业务低谷期）普遍出现负载率低于30%的凹陷。数据中心电源系统在负载率大幅波动的情况下，需要保证高能效、高动态特性和高容错性，控制碳排放以及整体运营成本，维持系统可靠运行。

1.2 数据中心电源系统架构

常见的数据中心电源系统架构如图1所示，主要包括市电与柴油发电机引入、高压配电、变压器、低压配电、不间断电源（交流/直流）、末端配电和服务端电源。数据中心电源系统可分为配电环节与功率变换环节，旨在为服务器提供12 V/48 V直流电，其中配电环节的功耗主要为电缆线损，受限于工程经济性要求，通常认为无法调节；不间断电源与服务器电源作为高频开关电源设备，实现电压转换与功率调节，不同的工作点对应不同的运行效率，即工作状态将影响数据中心的PUE，故作为绿色低碳数据中心的重要研究对象。

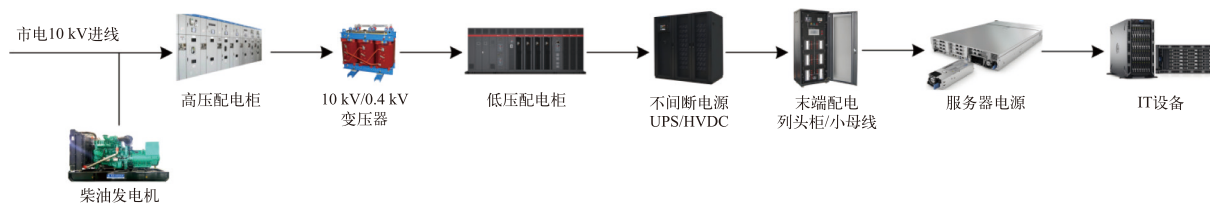


图1 数据中心电源系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of data center power systems

2 智能休眠模式的必要性

不间断电源（Uninterruptible Power Supplies, UPS）或高压直流电源（High-Voltage Direct Current, HVDC）作为数据中心供配电系统的

关键组成部分，为适应高效节能、高可靠性的要求，当前主流产品均采用高频模块化设计。在安装维护、后期扩容、安全高效等方面，模块化电源具备传统一体式电源无法替代的优势，因此在数据中心得到广泛应用。

服务器电源类似于模块化电源设计，由多台电源供应单元（Power Supply Unit, PSU）冗余组成，为满足服务器对电源效率和可靠性的严苛要求，包含 $N+M$ 、 $2N$ 等冗余配置，通过电源冗余以及高效的能源管理、智能监控，确保服务器高效、可靠运行。

虽然开关电源设备具备高效、高功率密度等众多优点，但在轻载下的效率问题、谐波电流问题以及检测准确度问题不可忽视，且冗余设计

会进一步降低负载率，加剧轻载下的问题。如图2所示，当负载率小于20%时，效率、功率因数（Power Factor, PF）和总谐波畸变率（Total Harmonic Distortion, THD）等指标均显著变差，而开关电源在满足IEC 61000-3-2标准对PF和THD的要求，以及GB 20943—2025和80PLUS对运行效率的规定基础上，应尽可能提升效率、抑制谐波，以降低设备成本和运营成本。

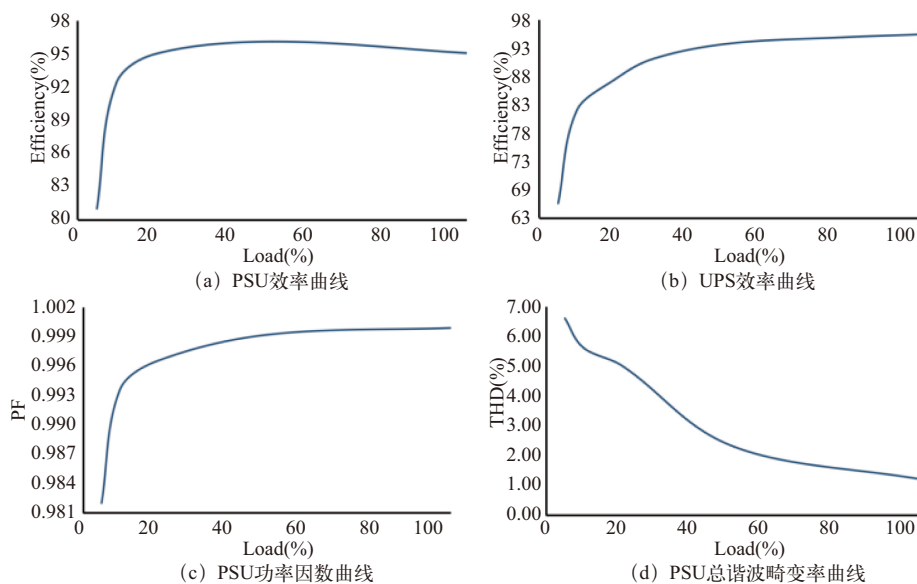


图2 开关电源特性曲线

Fig. 2 The characteristic curve of switch power supply

智能休眠模式作为一种特殊的设备运行方式，通过监测系统负载率，基于效率最优的控制目标，动态调节设备的运行状态，即通过优化软件，提供低成本、灵活可靠的解决方案。当负载率较低时，控制部分模块化电源进入休眠模式，即处于冷备份状态，仅有静态功耗，等待指令唤醒。

3 智能休眠模式的设计

智能休眠模式在数据中心电源系统的部署需突破单一能效优化范式，构建多目标协同控制架构，实现电能损耗最小化，同时保障系统的可靠性，并对休眠与唤醒机制的全维度条件进行理论分析。下文将分别针对数据中心内服务器电源、模块化电源的方案设计进行说明。

3.1 服务器电源

服务器电源电路拓扑一般由功率因数校正（Power Factor Correction, PFC）电路与DC/DC变换电路两级组成，其中PFC级用于改善电源系统的功率因数，减小谐波污染，将市电转换为高压直流电，为后级DC/DC电路提供稳定的输入电压；DC/DC变换级用于将高压直流电转换为服务器所需的12 V/48 V直流电。通过定义电源管理总线（Power Management Bus, PMBus）特定命令，设计一种通用智能休眠模式，以便系统与电源进行信息、配置和监控方面的通信，可支持1+1、2+2和3+1等不同的电源冗余配置。

服务器电源智能休眠模式的整体架构与控制框图如图3所示。使能智能休眠模式后，仅开启

维持最高供电效率所需的PSU，其他PSU均处于休眠状态。在休眠状态下，服务器电源的中央控制器将DC/DC变换级的开关管驱动信号关闭；但保证前级的PFC开启，并控制开关管工作在最低频率，减小开关损耗，确保其输出电容处于可充电状态，维持正常电压值；辅助电源、采样电路、通信电路与保护电路等均正常工作，即处于一种功耗最低的待机状态。默认的初始状态为所有PSU开启，开启智能休眠模式后，始终保证至少有一台PSU处于工作状态。

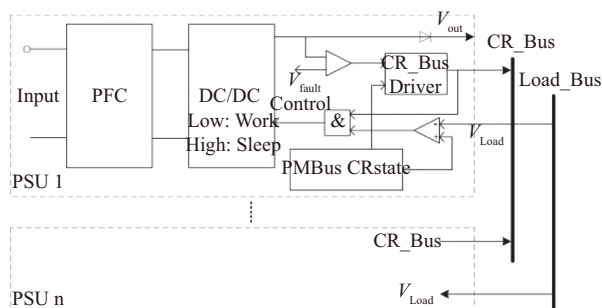


图3 服务器电源智能休眠模式控制框图

Fig. 3 Block diagram of server power supply intelligent sleep mode control

为实现精准可控的智能休眠模式，每台PSU均设置一个专用于驱动智能休眠模式的附加信号，定义为CR_Bus，用于出现故障时通知电源系统。其信号发生电路如图4所示，共有高电平、低电平和高阻态三种状态，由上管、下管与上拉电阻组成。当上管驱动信号为低电平、下管驱动信号为低电平时，输出高电平；当上管驱动信号为高电平或低电平、下管驱动信号为高电平，输出低电平；当上管驱动信号为高电平时、下管驱动信号为低电平时，输出高阻态。信号发生电路的驱动信号由初始状态、CR使能信号、故障指示信号等共同决定，当CR使能信号为低电平时，信号发生电路被使能；当出现故障后，下管驱动变为高电平，CR_Bus被拉低。CR_Bus是服务器电源中所有PSU共用的总线，CR_Bus的高阻态用于PSU上电的初始状态，当判定系统接入稳态时，具备进入智能休眠模式的条件后切换为其他状态；当CR_Bus被拉高时，

允许PSU进入智能休眠模式；当CR_Bus被拉低时，强制所有PSU退出智能休眠模式。当任一电源发生故障或输出电压低于设定的故障阈值时，CR_Bus信号会被拉低触发，所有PSU立即退出休眠逻辑。

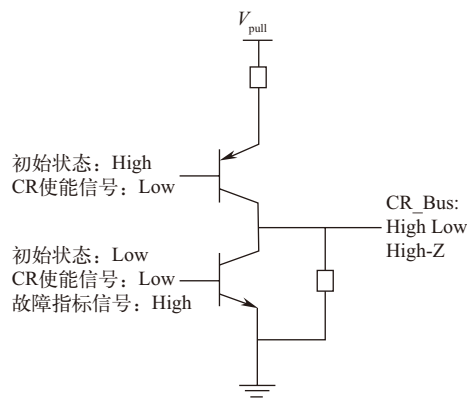


图4 CR_Bus信号发生电路

Fig. 4 CR_Bus signal generation circuit

为保障可靠性，除利用CR_Bus作为常规故障检测之外，另设置用于快速隔离故障的专用信号，定义为 V_{fault} ，作为PSU主输出信号故障状态位，专用于检测PSU主输出状态。若出现主输出掉电、异常波动等现象，可以立即标识出异常的PSU，用于快速故障隔离。通过CR_Bus与 V_{fault} 的共同保障，即使系统的休眠状态软件配置错误，也不会导致处于工作状态的电源系统出现关闭或过载等故障。

负载率为指导休眠方案设计的核心参数，定义负载总线电压信号为 V_{Load} ，负载功率与 V_{Load} 电压值一一对应，每台PSU分别监测 V_{Load} ，并与各自PMBus命令设定的编程电压 V_{cr} 进行比较，可实现电源的最佳效率管理逻辑，将比较结果与CR_Bus信号进行逻辑“与”处理，生成PSU中DC/DC级的控制信号。若控制信号为低电平，将DC/DC级使能，PSU处于唤醒状态；若控制信号为高电平，DC/DC级被禁用，即PSU进入智能休眠状态。

每台PSU预设的 V_{cr} 均不同，在运行过程中，处于智能休眠状态的PSU需要实时监测 V_{Load} ，将各自的 V_{cr} 电压值与 V_{Load} 作比对，以精准判断切换到开启状态的时机。进入休眠与唤醒的阈值如

图5所示,以由4台PSU组成的服务器电源为例, V_{Load} 电压值由CR_Bus信号发生电路中上拉电压决定,满载状态下对应为8 V。为避免休眠状态频繁切换,提高抗干扰能力,在休眠与工作切换过程中引入滞回区间,即在负载增加与负载减少两种条件下采用不同的阈值。

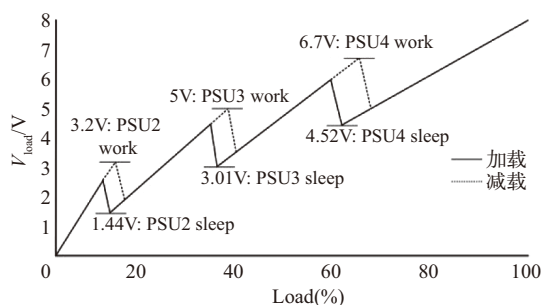


图5 服务器电源工作状态切换阈值关系图

Fig. 5 Graph of the threshold relationship for server power supply operating state switching

为了保证每台PSU的寿命一致性,系统在每次电源开机、电源故障或电源插入系统时会重置PSU的编号,下次按照新顺序依次控制PSU进入智能休眠模式。

3.2 模块化电源

对于UPS/HVDC等模块化电源,各功率模块采用并联方式,通过RS 485通信总线、并机信号线连接,实现模块之间的状态监测与通信,进而根据预设算法动态调整各自的工作状态。

休眠方案的重点为休眠/唤醒的逻辑与故障隔离措施,可采用的实现方式包括计算法和查表法,其中查表法通过预设的可用度与冗余模块数映射表,能够实现快速决策,具有较低的硬件成本,但灵活性有限,适用于负载稳定的场景。下文以计算法为例,具体实现步骤如下。

1) 同服务器电源,每台功率模块均设置一个专用于支持智能休眠模式的附加信号,用于指示系统故障状态,保证系统的可靠性,一旦出现故障,确保立即退出智能休眠模式。

2) 对智能休眠模式设置使能开关,可由程序控制并对使用者开放,即将智能休眠模式设置为附加功能,由用户选择启用或是关闭。

3) 当判定电源满足进入智能休眠模式的条件后,从通信总线实时读取负载功率,计算负载容量模块数 $N_L = \text{负载功率} \div \text{单台功率模块额定功率}$,结果向上取整。

4) 定义安全模块数为 N_A ,在保证最优效率的情况下,预留一定的功率模块作为备用,提高可靠性。若 $N_L \in (2, 4)$,设定 N_A 为1;若 $N_L \in (5, 10)$,设定 N_A 为2;若 $N_L \in (11, 20)$,设定 N_A 为3。

5) 计算休眠模块数 N_S ,定义功率模块总数为 N ,公式为

$$N_S = N - N_L - N_A \quad (1)$$

6) 接收到休眠指令的功率模块,由其中央控制器关闭驱动芯片的使能信号,进入休眠,等待指令唤醒。对于UPS,关闭逆变器;对于HVDC,关闭整流器。

为了保证产品每个功率模块寿命的一致性,对每个模块由大到小预设编号,按照编号以时间为单位轮询执行休眠,轮询周期可根据用户需要设定为1~10天。轮询的执行需根据休眠模块数 N_S 与休眠轮询时间来执行,系统启动智能休眠模式后,记录每个模块的休眠时间,当休眠时间达到设置的休眠轮询周期时,将所有功率模块唤醒,然后执行下一轮的休眠轮询周期,模块进入休眠的顺序按上一轮休眠时间由短到长进行排列,即休眠时间最短的模块在下一个周期优先进入休眠模式,如此循环运行。

工作过程中,若出现负载的大幅动态波动,由于模块由休眠到工作的唤醒过程需要时间,则可能出现因功率模块来不及启动,而导致部分功率模块出现过载保护、过热保护等现象,最终导致系统故障。对于该故障的应对措施,由于功率模块自身具备一定的过载能力,若负载功率超过功率模块带载能力的110%,则将休眠模块的工作状态切换为旁路供电,即负载由市电直供,等系统达到稳态后,再恢复正常休眠逻辑。

4 智能休眠模式的节能效果

为验证智能休眠模式的实用性,以一台320 kW /400 kV·A的模块化UPS为例,对其节能

效果进行说明，设定产品负载率为0.9，即满载对应288 kW阻性负载，共配置10台功率模块，均流度控制在10%以内，每台功率模块平均带载率为10%。

首先对导入智能休眠模式后的节能效果进行理论分析。设定系统负载率为10%，即每个功率模块负载率均为10%，根据产品手册效率曲线图可得出，该负载率下的效率约为85%。使能智能休眠模式后，10台功率模块的工作状态发生切换，其中8台模块进入休眠，2台模块正常工作，处于工作状态的模块平均负载率约为50%，对应的效率约为93%，2台带载模块总功耗为34.4 kW，8台休眠模块的总静态功耗为0.6 kW，系统总功耗为35 kW，效率约为91.4%。即导入智能休眠模式后，效率提升6.4%，一天可节省耗电量约49 kW·h，节能效果可观。

然后对导入智能休眠模式后的节能效果进行实验测试。共投掷16个负载档位进行测试，数据见下表。

表 导入智能休眠模式前后效率对照
Tab. Efficiency comparison before and after implementing intelligent sleep mode

档位	输出功率/kW	休眠前效率(%)	休眠后效率(%)	档位	输出功率/kW	休眠前效率(%)	休眠后效率(%)
1	4	44.4	60.61	9	134.8	92.71	93.06
2	15.6	75.1	84.78	10	149.4	92.8	92.75
3	34.9	84.61	90.03	11	164.8	92.79	93.05
4	46	88.02	91.6	12	195	93.12	93
5	67.6	90.27	92.24	13	216.8	92.97	93.05
6	78.4	91.1	92.4	14	231	92.92	93.06
7	101.8	92.04	92.28	15	261.6	93.43	93.36
8	116.6	92.39	92.43	16	288	93.4	93.39

由表中可知，负载档位3对应10%负载率，与理论分析结果相近，得出结论为模块化电源导入智能休眠模式后效率提升明显，且负载率越低，节能效果越显著。

5 结束语

对于数据中心电源系统在轻载下出现的效

率低、谐波大等问题，本文提出一种智能休眠模式，应用于不间断电源、服务器电源等开关电源产品，通过精确的负载监控、智能化的负载分配以及合理的冗余设计，实现了高可用性与高能效的协同优化，既保证了数据中心供电的稳定性，又在节能降耗方面展现出显著优势。随着政策对数据中心PUE要求的不断提高，智能休眠将成为电源系统节能优化的关键设计之一，推动数据中心向绿色低碳方向发展。

参考文献

[1] 王永真,唐豪,魏一鸣,等.中国数据中心综合能耗及其灵活性预测[J].北京理工大学学报(社会科学版),2025,27(2):12-17.

[2] 朱欢,张彩云,赵秋运.互联网发展对碳生产率的影响:基于工业化阶段演进的视角[J].北京理工大学学报(社会科学版),2023,25(5):15-27.

[3] 魏一鸣,余碧莹,唐葆君,等.中国碳达峰碳中和路径优化方法[J].北京理工大学学报(社会科学版),2022,24(4):3-12.

[4] 魏一鸣,陈炜明.碳减排“时-空-效-益”统筹理论:总体框架[J].北京理工大学学报(社会科学版),2024,26(5):1-11.

[5] 何霞.通信开关电源休眠节能技术的应用分析[J].通信电源技术,2022,39(23):52-57.

[6] 梁露露,刘强,刘绚,等.低负载率下数据中心模块化UPS的智能休眠技术研究[J].电信工程技术与标准化,2023,36(z1):84-88.

[7] YU P, FU W, WANG L, et al. Reliability-centered maintenance for modular multilevel converter in HVDC transmission application[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 9(3): 3166-3176.

作者简介

邱格（1994—），男，硕士，研究方向为数据中心供配电系统及其控制。

（收稿日期：2025-04-09）