

某高性能计算中心供配电系统设计

文/中国科学院计算机网络信息中心 牛广锋

结合某高性能计算中心设计实例和国家电网的供电可靠性数据，探讨一种提升高性能计算中心供电效率和降低投资的供配电系统设计方案。某高性能计算中心允许计算单元偶尔断电，允许存储设备有序停电。由于市电有较高的可靠性，通过针对性设计，减少供配电设备数量，可降低初始投资和运行损耗。对数据中心的配电规划设计有一定借鉴作用。

高性能计算应用于诸多领域，成为推动科技创新、社会进步的重要工具，其发展水平逐渐成为衡量一个国家综合国力和国际竞争力的重要指标。随着计算能力的增长，高性能计算机的功耗不断提升，高性能计算中心（以下简称数据中心）面临着高投入和高耗能的挑战。通常情况下，高性能计算中心的电气和制冷等基础设施投资达数亿元，每年电费支出以千万元计。高性能计算中心的能耗除了IT设备能耗外，还有制冷设备消耗、供配电系统的损耗以及其他设施的消耗。

供配电系统是数据中心核心基础设施，在数据中心中供配电系统投资一般占机电总投资的50%以上，能耗占7%以上。数据中心的负载率一般不会达到满载，2N架构数据中心的负载率最高为40%，有的甚至为10%~20%。在低负载率时供配电系统的效率会降低至85%~90%。由于电力电子设备取得巨大进步，

已没有太多的改进空间，因此技术人员将效率提升的关注点从电力电子设备的改进转移到供配电系统拓扑上，通过系统级改进实现整体效率提升。

为了降低投资和能耗，根据数据中心的业务特点进行合理设计十分必要。大量文献介绍了数据中心的电气设计，这些方案多依照数据中心标准的某一级别进行设计，缺乏针对性。本文根据国家电网的供电质量数据和高性能计算业务的实际需求，对供配电系统进行大幅度简化。与通常的数据中心相比，供配电系统的设备数量大幅度减少，投资和能耗则相应降低。

本文以某先进计算项目为实例，探讨分析数据中心供配电系统的设计方案。数据中心机房楼总面积近1万m²，纯机房面积1 000多m²，其余为支持区和辅助区。冷站房和供配电室位于地下，计算机房位于地上一层和二层。数据中心主要负荷见表1。

表1 数据中心主要负荷列表

供电位置	负荷明细	装设功率/ kW	需要系数	功率因数	使用功率/ kW	用电需求
一层	计算单元	17 544	1		17 544	直流，单电源
	计算单元散热辅助设备	220	1	0.9	220	双路市电，其中一路带UPS
	高速网络设备	368	1	0.98	368	
	冷板式制冷柜	6	1	0.9	6	
	监控设备	8	1	0.98	8	
	冷冻水行间空调	3	1	0.9	3	

(续)

供电位置	负荷明细	装设功率/ kW	需要系数	功率因数	使用功率 /kW	用电需求
一层	普通交换机柜	33	1	0.98	33	双路市电，其中一路带UPS
	安防、建筑设备管理系统	64	1	0.9	64	
二层	存储设备	306	1	0.98	306	
	互联网络接入设备	16	1	0.98	16	双路市电
	冷冻水列间空调	45	1	0.9	45	
	普通精密空调	100	0.8	0.9	80	单路市电
	高压直流电源（西）	469	1	0.98	469	
	高压直流电源（东）	408	1	0.98	408	
地下一层	冷却水泵一	90	0.7	0.9	63	双路市电
	冷却水泵二	165	0.7	0.9	115.5	
	水冷空调（为主配电室、分配电室制冷）	20	0.8	0.9	16	双路市电，其中一路带UPS
	水冷空调（为UPS设备、电池室制冷）	10	0.8	0.9	8	
	UPS设备	56	1	0.98	56	
地下二层	冷水机组	680	1	0.9	680	双路市电（中压10 kV）
	冷却泵水泵	85	1	0.9	85	双路市电
	一次水泵	30	1	0.9	30	
	二次水泵	55	1	0.9	55	双路市电，其中一路带UPS
	冷却水泵一	90	0.7	0.9	63	双路市电
	冷却水泵二	165	0.7	0.9	115.5	
室外	冷却塔（计算单元用）	180	0.8	0.9	144	双路市电
	冷却塔（冷机用）	60	1	0.9	60	
	其他	160	1	0.9	160	

设计分析

高性能计算系统可分为两部分：计算单元和存储单元。计算单元由计算模块和高速网络组成，完成计算任务。存储单元由磁带库和磁盘阵列组成，负责保存计算过程中的数据和计算结果。计算单元负责计算，计算结果由高速网络传输到存储单元，在电力中断后，计算单元失电后失去所有数据。存储单元保留计算的中间结果和最终结果，突然断电会造成数据格式混乱，带来较大损失。因此，存储单元至少需要一路UPS供电，确保市电闪断或者异常情况下电力供应不中断。电力供应持续时间要满足存储单元自动关机和中间结果存储的需要。在电力供应正常后，计算单元从存储单元获取中间结果继续计算，即损失可弥补、可挽回，计算单元对供电连续性要求并不特别高。业主对计算单元供电要求进行了定性描述，即不能频繁发生断电事故。

2019年度，国网北京电力的城市地区业主平均停电时间低于1 h/户，可用度非常高。根据国家能源局电力可靠性管理和工程质量监督中心提供的数据，2020年上半年，国网北京电力的城市地区平均

供电可靠率为99.993 2%，平均停电时间0.3 h/户，0.15 次/户。Uptime Tier数据中心等级认证体系是数据中心业界知名权威的认证。机房的最高等级Tier IV只能允许平均每年0.8 h故障时间，次一级Tier III只能允许平均每年1.6 h故障时间，见表2。

表2 不同等级机房的可用性

等级	可靠性（%）	年平均故障时间/h
Tier IV	99.995	0.8
Tier III	99.982	1.6
Tier II	99.741	22
Tier I	99.671	28.8

通过数据对比可发现，国网北京电力公司的供电可靠性已非常高。平均停电时间已接近甚至超出最高级Tier IV的要求，单纯为了提高市电可靠性而增加投资已没意义。基于以上数据，从投资和电力损耗考虑，经与业主沟通，高性能计算系统的计算单元按三级负荷考虑，其供电系统参照国标C级设计，采用单路市电直供。

考虑到监控系统、安防系统、存储设备、为存储设备服务的持续制冷设备和部分二次水泵的重要

2. 低压系统

根据计算单元的负荷数据，采用8台2 500 kV·A变压器和1台1 600 kV·A变压器作为电源。每台2 500 kV·A变压器为10台高压直流电源供电，提供2 142 kW电力。1台1 600 kV·A变压器为6台高压直流电源供电，提供1 285 kW电力。每台高压直流电源向2台计算单元提供380 V直流电力。

除了计算单元外，其余负荷的使用功率总计为2 064 kW，考虑采用2台2 500 kV·A变压器作为电源。2段低压母线分段运行，中间设置联络开关。2台变压器为需要双路市电的设备供电。其中1台变压器的输出包括UPS。使用UPS作为电源设备的功率需求为1 132 kW，选用4台400 kV·A UPS并机运行。

制冷系统的各种循环水泵、冷却塔等大型设备都采用了变频器以节省能源，谐波治理和功率因数补偿就地解决。

设计难点

按照数据中心标准，数据中心应划分为A、B、C三级。高性能计算中心与普通数据中心的需求不完全相同，无法具体划分到某一级别。最简单或者通常的处理办法是按照高等级设计。显然这种处理方式必然会增加供配电设备，增加投资。在后期运维期间，增加的设备将带来额外的电能损耗，不利于节能，不符合绿色数据中心发展方向。

高性能计算中心允许计算单元偶然失电，也允许存储设备、制冷单元和监控系统等设备按一定流程失电，即在外电源失电后，存储设备可从容地保存临时数据并退出系统。除了IT类设备，供电系统还需考虑制冷系统、智能化系统的用电需求。由于不能完全按照某一级别的数据中心进行设计，设计师需根据用电设备的特点和业务需求进行合理配置。

结束语

随着大数据、AI等技术发展，高性能计算中心的建设需求日益增长。高性能计算中心用电量大，

用电密度特别高，在供配电设计过程中需考虑节能、投资等限制因素。本文根据我国市电供应的高可靠性水平，通过分析数据中心供配电系统实例，为其他类似工程提供参考。EA

参考文献

- [1] 赵毅，朱鹏，迟学斌，等．浅析高性能计算应用的需求与发展[J]．计算机研究与发展，2007，44(10)：1640-1646．
- [2] 迟学斌，顾蓓蓓，武虹，等．高性能计算机系统与平台发展状况分析[J]．计算机工程与科学，2013，35(11)：6-13．
- [3] 焦建欣．高性能计算中心功能与设计探讨[J]．智能建筑电气技术，2013(1)：13-18．
- [4] 宋飞，姚信安，胡世平．高性能计算中心供电系统探讨[J]．计算机工程与科学，2013，35(12)：14-19．
- [5] 陈实．新型数据中心供配电设计要素浅析[J]．智能建筑电气技术，2016(6)．
- [6] 王志强．大型数据中心供配电系统设计研究[J]．电信技术，2014，1(04)：32-37．
- [7] 中国电子工程设计院．数据中心设计规范：GB50174—2017[S]．北京：中国计划出版社，2017．
- [8] 周霞，陈旦，李霞．我国供电可靠性的现状分析与展望[J]．供用电，2021，38(1)：49-54．
- [9] 丁雪鹏，吴攀峰．数据中心20 kV供配电系统及柴油发电机组的设计[J]．电气应用，2020，39(5)：89-93．
- [10] 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．
- [11] 谢志文，何宏明，韩博文，等．基于时空源三维度的高压开关柜的可靠性分析[J]．电气应用，2020，39(9)：23-28．