

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.017

电网企业数据中心能效测量与计算方法研究

李卓晖

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]在国内, 电网企业数据中心的能耗正日益提高。为有效地计算出数据中心的整体能源效率状况, 提出了一种可行的电网企业数据中心能效测量标准与计算方法。[方法]通过研究国内外数据中心能效的测评方法, 针对电网企业数据中心多与办公楼公用部分基础设施的特点, 提出了准确计算IT负载、优化机柜配电单元耗电量估算、优化冷却水系统耗电量估算等3种优化方法, 给出了优化的能效测量计算方法。[结果]研究成果表明: 应用该方法, 可将非数据中心区域消耗的能源在计算中分离出来, 比常规的计算方法更准确, 更贴近于国际通用的数据中心能效定义, 能更真实地反映电网企业数据中心的能效水平。[结论]所提方法简单有效, 可为电网企业不同数据中心之间的能源效率比较和节能水平评估提供依据。

关键词: 电网企业; 数据中心; 能效测量; 能效计算

中图分类号: TP308

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)04-0111-06

Research on Measurement and Calculation of Power Grid Enterprises Data Centers Power Effectiveness

LI Zhuohui

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] In China, the power consumption of power grid enterprises data centers is increasing. To calculate the whole energy effectiveness condition of the data centers, this paper proposes a feasible power grid enterprise data center energy effectiveness measurement standard and calculation method. [Method] By studying the data center energy effectiveness evaluation methods both in China and abroad, in view of the features which power grid enterprises data centers may share some of the infrastructure with their office buildings, we proposed three kinds of optimization methods, including accurate calculation of IT load, optimized estimation of power consumption of power distribution unit in the cabinet, optimized estimation of power consumption of the cooling water system, and the optimized energy effectiveness measurement and calculation method. [Results] The results show that: by using this method, energy consumption in non-data center regions can be separated in calculation, which is more accurate than the conventional calculation method, closer to the international general data center power effectiveness definition, and can truly reflect the power effectiveness level of power grid enterprise data center. [Conclusion] The proposed method is simple and effective, which can provide the basis for comparing energy effectiveness with different data centers and energy saving level assessment.

Key words: power grid enterprises; data center; energy effectiveness measurement; energy effectiveness calculation

当前, 绿色低碳经济既是国家政策层面的要求, 也是国际发展的趋势。根据数据显示, 全球数据中心的能耗大约占到全部能耗的1.5%, 而与此

相对的, 由于数据业务总量、建设成本、建设水平等因素的影响, 我国数据中心所消耗的能源占全社会能源消耗的比例更高, 达到大约2%^[1]。随着云计算、大数据以及人工智能的快速发展, 全国的数据中心数量越来越多, 建设规模越来越大, 随之而来的是在提供越来越高的计算能力的同时也在消耗着更多能源。此时, 电网企业作为国际的能源骨干

收稿日期: 2017-12-29 修回日期: 2018-02-24

基金项目: 中国能建广东院科技项目“数据中心关键技术研究”(EX03931W)

企业,更应当响应国家号召,提倡绿色低碳的发展道路,建设并运营绿色节能的数据中心。

目前,电网企业的数据中心主要指承载信息、通信、自动化等业务的数据中心,同时还有其他专用的业务数据中心,例如:用于科研实验或营销计量的。不同于互联网企业或通信运营商的数据中心,电网企业的数据中心主要有以下几个特点:(1)规模相对而言比较小。一般来说,一个中等规模的地市级自动化机房在100面机柜以内,网级的自动化机房建设规模可以到达400面机柜以上。相较之下,互联网的数据中心动辄就有几千乃至上万个机柜;(2)更分散。不同业务类型的数据中心往往是独立建设的,如某电网公司自动化机房和通信机房;当然也有一些是两个业务合并建设而成,如某地市级电网公司的信息通信机房;(3)可靠性要求极高。电网企业的数据中心承载的主要是调度自动化、通信和继电保护等生产业务,在极端情况下还要保障关键业务不中断。因此,数据中心作为保障电网生产的重要基础设施,关键节点与设施都要保证冗余度和可靠性。这个特点决定了电网企业数据中心对于新型的节能技术应用持较保守的态度,往往更倾向于经过时间验证的传统技术;(4)与办公大楼合并建设,电网企业数据中心常常建设在办公大楼内,尤其靠近业务管理部门办公场地,以便于运维与管理。而办公大楼建筑本体设计建设时主要考虑的是办公需求,缺乏对数据中心节能效果的特定优化,导致数据中心能耗居高不下。以上这几个特点对电网企业数据中心的节能而言是一个极大的挑战。

为了更好地指导数据中心的节能,在国际上,业界采用了不同的能效指标,其中应用最为广泛的是PUE(Power Usage Effectiveness)和DCiE(Data Center Efficiency),但是,国内目前还未建立起统一的数据中心能效指标体系,往往是沿用国际通用规范^[2]。而在国内的电力行业中,数据中心的能效测评更是刚刚起步,还未建立起行业的评估规范或标准,因此电网企业数据中心的管理人员往往缺乏精确的能效测量、计算和统计的方法,测量点的选取不标准、测量颗粒度太粗等问题普遍存在,导致计算出的能效指标与实际偏差较大,难以了解整个电网企业数据中心能源系统的损耗,统计的结果也就失去了和业界先进的绿色数据中心的可比性,从

而无法有效指导电网企业数据中心的节能。

因此,本文尝试研究和提出一套较易在电网企业数据中心中实现的能效测评标准与计算方法,能够较为准确地收集数据中心当前各部分能耗情况,同时统计当前与历史能耗指标,达到更好地规范和指导电网企业数据中心节能减排的目的。

1 技术背景

近年来,数据中心的能耗问题引起了诸多国家政府与相关国际组织的关注,他们通过制定数据中心能效的相关规范和标准,提高数据中心的能效管理水平。这中间,影响力比较大的包括数据中心能效研究组(JTCl study group on energy efficiency of data centers, SG-EEDC)和国际电信联盟(ITU-T SG5)。他们都为数据中心的绿色节能理念的推广和能效标准的制定做出了重要贡献^[3]。

还有一些国际组织也在制定相关的标准,以推动绿色节能数据中心的建设,其中最成功的是绿色网格组织(GreenGrid)。该组织是致力于降低全球数据中心能源消耗的非营利性组织,由IBM、微软等几家知名IT公司联合建立。而创立了全球最权威的绿色建筑LEED认证体系的美国绿色建筑委员会(USGBC),也针对数据中心建筑增加了绿色认证标准。绿色网格组织已成功开发出一套提高数据中心能效的指标,包括PUE、DCiE等,这些指标都在世界范围内被广泛使用,成功地为大量数据中心的建设和运营提供能源效率比标准^[4]。

2 能耗指标的定义

2.1 电能利用效率

除少数应用可再生能源供电的数据中心外,数据中心的能源消耗全部为电能消耗。对电网企业的数据中心,由于可靠性要求很高,一般不考虑应用可再生能源。因此,电网企业数据中心的能源效率也相当于电能效率。典型的数据中心电能负载如图1所示^[5]。

根据绿色网格组织的研究成果,PUE和DCiE是数据中心的两个最重要的能效指标:PUE体现数据中心能源效率的总体情况;DCiE则体现数据中心有效能耗的比率。两者的具体定义为:

$$PUE = \frac{\text{数据中心总耗电(Total Facility Power)}}{\text{IT设备耗电(IT Equipment Power)}} \quad (1)$$

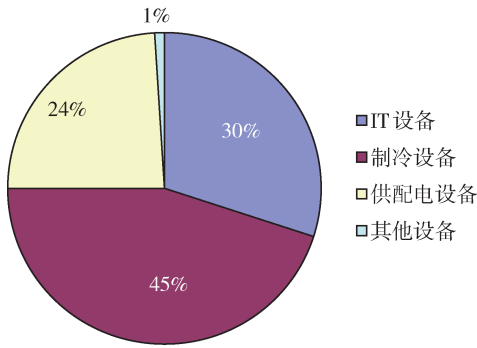


图 1 典型数据中心电能消耗构成

Fig. 1 Power consumption of a typical data center

$$DCiE = \frac{\text{IT 设备耗电(IT Equipment Power)}}{\text{数据中心总耗电(Total Facility Power)}} \times 100\% \quad (2)$$

2.2 局部电能利用效率

局部电能利用效率, 即 partial PUE (pPUE), 实际上是对 PUE 概念的深化, 其目的是对大型数据中心的某特定局部区域能效进行测量和分析^[6]。

如要计算 pPUE, 需先从数据中心中划分出多个分区。例如, 将同一建筑内的电网企业自动化机房定义为区域 1 (Zone1), 通信机房定义为区域 2 (Zone2)。

如图 2 所示, 如果将机房划分为自动化机房 (Zone1) 和通信机房 (Zone2) 两个分区, 则两个区域整体 PUE 可采用以下公式计算:

$$PUE = \frac{N_0 + N_1 + N_2 + I_1 + I_2}{I_1 + I_2} \quad (3)$$

式中: I 代表数据中心的 IT 设备的耗电量; N 代表除 IT 设备以外其他设备的耗电量。

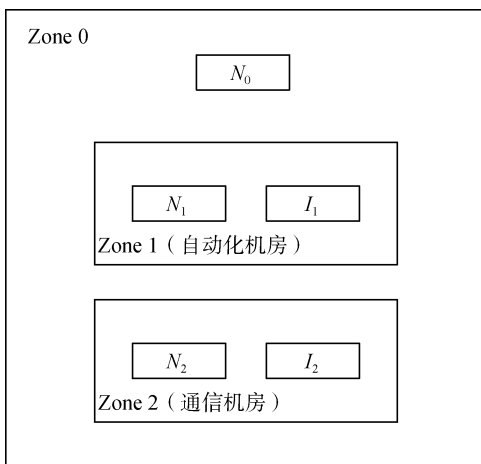


图 2 局部 PUE 计算示意图

Fig. 2 Partial PUE calculation diagram

上述自动化机房和通信机房这两个分区的局部 PUE 则可采用以下公式计算:

$$pPUE1 = \frac{N_1 + I_1}{I_1} \quad (4)$$

$$pPUE2 = \frac{N_2 + I_2}{I_2} \quad (5)$$

局部 PUE 适合用于同一建筑内有多个数据中心的局部能效评估。对于电网企业数据中心来说, 自动化机房与通信机房, 甚至自动化机房或通信机房中的各个独立分区都可独立计算 pPUE。通过计算自动化机房或通信机房的 PUE, 可对其中计算值较高的机房进行针对性的优化, 从而提升整体数据中心的能效状况。

2.3 制冷/供电负载系数

从 PUE 延伸出来的能效指标还包括制冷负载因素 CLF (Cooling Load Factor) 和供电负载因素 PLF (Power Load Factor), 他们的定义分别是:

$$CLF = \frac{\text{制冷设备耗电}}{\text{IT 设备耗电}} \quad (6)$$

$$PLF = \frac{\text{供配电系统耗电}}{\text{IT 设备耗电}} \quad (7)$$

CLF 和 PLF 这两个指标实质上是对 PUE 的进一步细化, 他们可以分别体现数据中心的制冷系统和配电系统的能源效率, 从而进行有针对性的分析和优化^[7]。

制冷系统和配电系统是数据中心的能源消耗最大的两个系统, 相对于这两个系统而言, 其他系统或设备如消防、监控、环境照明等的耗电量几乎可忽略。因此, 可推导出以下近似公式:

$$\text{数据中心总耗电} \approx \text{制冷设备耗电} + \text{供配电系统耗电} + \text{IT 设备耗电} \quad (8)$$

将以上各项同时除以 IT 设备耗电, PUE 可以简化为:

$$PUE \approx CLF + PLF + 1 \quad (9)$$

由公式(9)可推导出, PUE 的取值应当大于或等于 1, 数据中心的 PUE 值越大, 则表示制冷系统和供电系统所消耗的电能越大, 相应的 IT 设备耗电占总耗电比例越小。由于 PUE 的定义简单、可测性高、易于计算, PUE 已经广泛地被国内外的数据中心所接受。而 PUE 的其他扩展概念中, DCiE 相当于 PUE 的倒数, pPUE、CLF、PLF 则是 PUE 的有效补充用于应对特殊的情景, 为针对电网企业

数据中心提出一个有效可行的能效计算方法,下文仅对 PUE 的测量和计算进行研究。

3 国内一般能效测量计算方法

目前国内一般的能效指标 PUE 测量方法如图 3 所示:

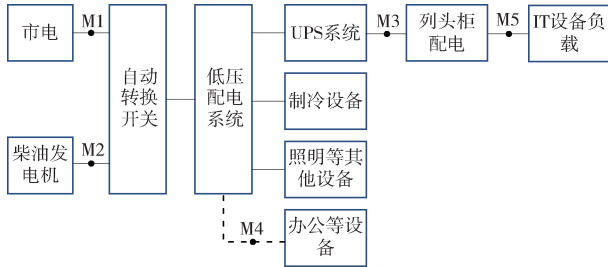


图 3 一般 PUE 测量方法

Fig. 3 General PUE measurements

数据中心总耗电量的测量可将 M1 点和 M2 点测得的耗电量相加。大多数数据中心的供电系统会配备柴油发电机,作为应急备用电源,而柴油发电机工作时也会带来电能的损耗,该损耗不能被忽略。因此,数据中心总耗电的测量应包含市电和柴油发电机两部分。而数据中心中往往会附带一些配套设施,如办公,这部分功能所消耗的电量不应计入 PUE 的范围内,因此 M4 点测出的电量应以扣除。

IT 设备耗电的测量可选取在 M3 点:UPS 系统的输出电量可很容易地获取。根据 PUE 的定义,IT 设备耗电量的测量应当选取在 M5 点更为准确,但在实际工程中,IT 设备的数往往相当庞大,且设备类型众多,要把他们的耗电量全部准确测出成本太高。

按照图 3 定义的测量点, PUE 的计算方法为:

$$PUE = \frac{P_{M1} + P_{M2} - P_{M4}}{P_{M3}} \quad (10)$$

式中: P_{M1} 、 P_{M2} 、 P_{M3} 、 P_{M4} 分别是 M1、M2、M3、M4 测量点所测出的耗电量)

4 现存问题

在电网企业的实际工程中,数据中心往往与办公大楼合建,对于此类数据中心而言,采用上述一般能效指标测量计算的方法将面临若干现实问题:

1)通过测量数据中心 UPS 输出功率作为 IT 负载耗电量,但该 UPS 系统往往也同时为其他数据中

心以外的重要负载供电,如监控中心或调度大厅的大屏幕及坐席设备等,此部分负荷不属于数据中心 IT 负载之列,但在实际测量中又难以将其分离。因此,这种测量方式会将很多本不属于 IT 负载的交叉能耗均统计在内,导致 PUE 值虚高。

2)将 UPS 输出功率作为 IT 负载耗电量实际上忽略了 UPS 后端至 IT 负载前端的配电设备及线路的损耗,如精密母线或配电列头柜、机柜配电单元(PDU)以及之间的线缆损耗。

3)由于电网企业数据中心是建设在电网办公大楼当中,数据中心中的某些子系统往往与数据中心以外的办公区域共用一些基础设施。典型的如数据中心精密空调的室外冷冻水系统往往是与其他办公用房共用的。

在此类电网企业数据中心中统计 PUE,大多会碰到以上的问题。但提出 PUE 理论的绿色网格组织也并未给出标准的计算方法。在这种情况下,如果采取国内一般的测量计算方法则会产生较大的误差,所得出的数值不但没有很好的参考意义,也难以与其他数据中心进行比较分析。因此,必须研究一种方法更准确地统计此类电网企业数据中心的 PUE 值。

5 解决方案

为解决问题,首先要将数据中心中的耗电负载进行分类。根据 PUE 的定义,可分为 IT 负载、供配电设备、制冷设备、其他设施四大类,如表 1 所示:

表 1 电网数据中心耗电负载分类
Tab. 1 Data center power load classification

IT 负载	供配电设备	制冷设备	其他设施
服务器	配电柜和开关	冷却塔	机房区域内照明
存储设备	ATS/STS	冷却水泵	控制中心照明
网络设备	发电机	冷冻水泵	消防系统
KVM	UPS	冷水机组	安防系统
灾备/镜像 IT 设备	PDU	加湿设备	其他弱电设备
—	其他应急电源系统	机房空调	—
—	—	新风系统	—

然后对应第 4 节提到的三个问题,采取以下优化的计算方法:

5.1 准确计算 IT 负载

电网企业数据中心 UPS 系统往往同时也在为其

他数据中心以外的重要负载供电, 将这些负载完全分离出来测量有一定难度。因此可直接测量向 IT 负载供电的配电列头柜(精密母线)的输出功率, 并累加起来作为 IT 负载的参考值。这样做不但考虑了 UPS 输出至列头柜(精密母线)输出之间的开关及电缆的损耗, 也将不属于数据中心的负载分离出来了。

5.2 机柜配电单元(PDU)耗电量的估算

PUE 的定义中 IT 负载的功耗仅包括服务器、存储设备、网络设备等 IT 设备功耗的叠加, 但若直接测量每台 IT 设备的功耗又较为费时费力。若如一般测量方法中将 UPS 或配电列头柜的输出功率作为 IT 负载的耗电量是较为准确且有效率的方式, 但也是有误差的, 因为该方法忽略了 UPS 或列头柜后端 PDU 以及电缆的损耗。如采用智能型的 PDU 测量数据(带电压、电流统计), 则统计量会非常大, 且往往 PDU 测量的数据不够精确, 通过这种方法累加的数据反而误差更大。

所幸的是, PDU 的损耗率是一个基本确定的值, 直接采用该损耗率来计算可得出更为准确的结果。根据国内外相关的研究, PDU 损耗率约为 3% (空载损耗 + 平方率损耗), 在实际工程中, 可通过实验计算既定选型的 PDU 损耗率。又因在一般数据中心当中, 配电列头柜(精密母线)已经较为靠近 IT 负载, 其后端的电缆损耗相对于 PDU 损耗来说可以忽略。从而可以得出:

$$\text{实际 IT 负载} = \sum \text{配电列头柜输出功率} \times (1 - \text{PDU 损耗率})\% \quad (11)$$

5.3 冷却水系统耗电量的估算

冷却水系统是包括冷却塔、冷却水泵等在内的为机房空调提供冷却水的一整套系统。系统组成如图 4 所示:

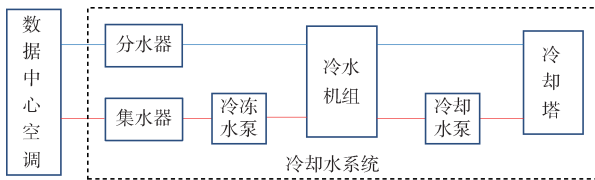


图 4 典型冷却水系统组成图

Fig. 4 Typical figure of cooling water system

该系统往往与电网企业办公大楼中其他非数据中心区域设备(如办公空调)共用, 根据 PUE 的定

义, 只需统计系统与数据中心关联的部分耗电量, 而此部分耗电量难以直接测量, 只能通过估算的方法得出, 具体如下:

测量数据中心精密空调的制冷量, 分别估算出冷水机组、冷却水泵、冷却塔、冷冻水泵的单位制冷量的耗电量, 再估算出整个冷却水系统的综合制冷能效比(一般为 4~5)。有了这两个数据就可计算出冷却水系统用于该数据中心的耗电量 = \sum 数据中心空调制冷量 \times 冷冻水系统能效比。

综上所述, 在建设于办公大楼中的数据中心的实际能效计算中, 可通过优化的测量计算方法得出较为准确的计算结果, 如图 5 所示:

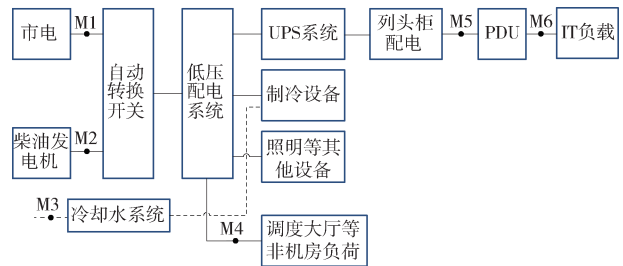


图 5 优化的 PUE 测量方法

Fig. 5 Optimized PUE measurements

$$\text{PUE} = \frac{P_{M1} + P_{M2} + P_{M3} - P_{M4}}{P_{M6}} \quad (12)$$

式中: $P_{M3} = \sum$ 数据中心空调制冷量 \times 冷冻水能效比; $P_{M6} = P_{M5} \times (1 - \text{PDU 损耗率})\%$ 。

根据以上方法, 可测量并计算出数据中心当前的 PUE 能效指标。而通常电网企业数据中心能效指标会受到诸多因素的影响而变化, 如 IT 设备的运行负荷, 配电设备的运行负荷, 环境和季节的变化等, 且若采用优化计算方法, 冷却水系统等参数一般是通过一个恒定的平均能效比数值估算出来的, 无法真实反映随时间变化的实时数据。因此测出当前的 PUE 指标仅是第一步, 若要更准确、全面地了解该数据中心的能耗, 并与业内其他数据中心的能耗数值进行比较的话, 应当对 PUE 值进行长期的测量和统计, 最终取平均值。

实际工程中, 为对 PUE 进行计算与分析, 应采取以上测量计算方法建设数据中心综合监控管理系统, 系统应提供能效管理模块, 可以分析并计算当前 PUE 值, 统计历史 PUE 值。能效管理模块的界面应包括 PUE 的测量和计算方法, 当前和

历史 PUE 的能效数据, 以及详细的能源成本分析。

目前国内外对 PUE 指标还没有统一的分级标准, 国内电网企业在运行的数据中心 PUE 值基本在 2~3 之间^[8], 国内较为节能新建数据中心一般在 1.6~1.8, 而国外最先进的绿色数据中心 PUE 值甚至在 1.2 以下, 但采用了多种极端的节能手段, 在国内电网企业中未必适合。通过能效测量、计算与统计, 可有效地衡量电网企业数据中心的能源成本, 指导数据中心的能效管理, 优化数据中心的能源效率。根据目前国内数据中心的一般情况, 若统计出 PUE 值大于 2.0, 则属于偏高水平, 有较大的优化空间^[9], 从而可使用多种方法改进数据中心的能效水平, 如:

1) 提升机房空调运行效率: 改善机房气流组织, 加强空调协同管理。

2) 降低空调使用时长: 合理设置制冷环境参数, 空调与新风联动控制, 条件许可时采用自然冷却替代。

3) 空调间接节能: 降低室内外温差, 改善室外环境, 强化机房围护结构保温。

4) 供配电设备节能: 采用高效率的供配电设备, 如高压直流电源、模块化 UPS 电源。

5) 提升 UPS 设备转换效率: 合理配置 UPS, 降低冗余量, 提高 UPS 负载率, 从而有效降低 UPS 设备的能源消耗。

6) 机房布线改造: 优化机房强弱电线路, 减少对气流组织的影响, 降低线缆上的电力损耗。

7) 其他节能方式: 采用高效率照明系统、加强机房管理等如改善气流组织、优化电源效率、改造数据中心布线等。

6 结论

目前, 我国还没有搭建起完整的数据中心能效指标规范及标准, 本文考虑了电网企业数据中心通常与办公大楼合建的特点, 采用了优化的测量计算方法, 相对于国内一般的计算方法来说更为准确, 更贴近于国际通用的数据中心能效定义, 更能真实地反映电网企业数据中心的能效水平, 更便于其他行业的数据中心进行比较。

电网企业数据中心通常和办公大楼共用部分基础设施, 难以将非数据中心区域消耗的能源单独分

离出来统计, 本文提出了一种易于操作的计算方法, 较为准确地估算出共用设施中与数据中心关联的部分能效, 可简单有效地计算出数据中心的整体能效水平。同时, 本文的统计方法易于在数据中心综合管理系统中实现, 并给出了可行的测量标准与计算方法。

参考文献:

- [1] 赵吉志. 数据中心能效评估指标分析 [J]. 信息技术与标准化, 2014(3): 14-16+23.
- [2] 巫晨云. 数据中心能效影响因素及评估模型浅析 [J]. 电信工程技术与标准化, 2014, 27(1): 46-49.
- [3] 谭思敏. 基于云计算数据中心的能效评估指标体系研究 [J]. 通讯世界, 2016(14): 97-98.
- [4] 杨茜, 李德英, 胡文举, 等. 国内外绿色数据中心建筑评价体系研究综述 [J]. 建筑科学, 2016, 32(10): 129-135.
- [5] 齐曙光, 余斌, 蔡树国. 数据中心基础设施 PUE 测量研究 [J]. 互联网天地, 2016(12): 90-96.
- [6] 郭佳哲, 张海涛. 数据中心局部 PUE 的测量与计算 [J]. 移动通信, 2016, 40(10): 54-57.
- [7] 朱江, 于震, 吴剑林. 典型数据中心能耗及热环境测试分析 [J]. 发电与空调, 2012, 33(6): 79-83+94.
ZHU J, YU Z, WU J L. Analysis of power consumption and thermal environment in a typical data center [J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2012, 33(6): 79-83+94.
- [8] 张乐丰, 欧阳述嘉, 张林锋, 等. 绿色数据中心节能技术及对供电模式的探讨 [C]// 中国电机工程学会. 2016 电力行业信息化年会论文集, 天津, 2016. 天津: 人民邮电出版社, 2016: 307-310.
- [9] 姚碧玉, 谢国财. 面向运维的电网运行数据分析系统开发 [J]. 广东电力, 2016, 29(10): 92-96.
YAO J Y, XIE G C. Development of operational data analysis system for operation and maintenance of power grid [J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(10): 92-96.

作者简介:



LI Z H

李卓晖 (通信作者)

1981-, 男, 广东广州人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力系统智能化设计及研究的工作 (e-mail) lizhuohui@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)