

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230348

考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性评估方法

王辉东¹, 高晋坤², 黄佳斌³, 余娟², 钱少锋¹, 姚海燕⁴

(1. 国网浙江省电力有限公司杭州市余杭区供电公司, 浙江 杭州 311121; 2. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 3. 国网浙江省电力有限公司杭州供电公司, 浙江 杭州 310016; 4. 杭州电力设备制造有限公司余杭群力成套电气制造分公司, 浙江 杭州 310016)

摘要: 大数据时代数据中心的规模逐年攀升, 并且具有高能耗、高弹性和互联互通的负载灵活性。然而当前电力系统运行可靠性评估研究忽略了数据中心的负载灵活性, 导致评估结果不准确, 且无法反映数据中心的能效状态。为此, 首先基于数据中心之间的互联互通和算力负载异地转移特性, 提出了数据中心负载灵活性模型。其次, 建立了包含数据中心能效与运行可靠性贡献等指标的电力系统运行可靠性评估指标体系。并进一步考虑电负荷、数据中心算力负载和风光等随机性因素, 建立了考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性评估模型, 提出对应评估方法。最后, 通过 IEEE RTS 算例和实际电网算例进行仿真, 结果表明数据中心的负载灵活性不仅有助于可再生能源消纳和电力系统安全可靠运行, 还有助于数据中心节能降耗。

关键词: 数据中心; 负载灵活性; 电力系统; 运行可靠性评估

Power system operational reliability evaluation method considering data center load flexibility

WANG Huidong¹, GAO Jinkun², HUANG Jiabin³, YU Juan², QIAN Shaofeng¹, YAO Haiyan⁴

(1. Hangzhou Yuhang District Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 311121, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China; 3. Hangzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310016, China; 4. Yuhang Qunli Complete Electric Manufacturing Branch, Hangzhou Electric Power Equipment Manufacturing Co., Ltd., Hangzhou 310016, China)

Abstract: In the era of big data, the scale of data centers has been increasing year by year. A data center has high energy consumption, high elasticity and interconnected load flexibility. However, current power system operational reliability evaluation research ignores the load flexibility of the data center, resulting in inaccurate evaluation results and an inability to reflect the energy efficiency status of the data center. This paper first proposes a data center load flexibility model based on the interconnection between data centers and the off-site transfer characteristics of computing power loads. Second, a power system operational reliability model including data center energy efficiency and operational reliability contributions is established. Further, considering random factors such as electrical load, data center computing power load, and wind and solar power, a power system operational reliability evaluation model considering data center load flexibility is established, and a corresponding evaluation method is proposed. Finally, through simulations on the IEEE RTS and a practical power system, the results show that the load flexibility of the data center not only contributes to the consumption of renewable energy and the safe and reliable operation of the power system, but also helps the data center to save energy and reduce consumption.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFE0191000).

Key words: data center; load flexibility; power system; operational reliability evaluation

0 引言

随着物联网、云计算及人工智能等技术的广泛

应用, 我国数据中心迅速发展。截至 2021 年, 我国是仅次于美国的超大规模数据中心容量地, 数据中心容量占世界总量的 15%^[1]。数据中心的高能耗问题也日益受到广泛关注, 2021 年全国数据中心总耗电量为 2256 亿 kWh, 约占社会总耗电量的 2.99%,

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFE0191000)

是当年三峡大坝发电量的 2.18 倍; 预计到 2025 年, 全国数据中心总耗电量将达到 3952 亿 kWh, 约占社会总耗电量的 4.10%^[2]。

数据中心不但能耗突出、分布集中、易于控制, 并且自身有很强的能耗弹性^[3-5], 同时依托云端互联和数据中心网络(data center network, DCN)技术能实现数据中心之间的互联互通, 以及算力负载异地转移, 改变电力网络中的负荷分布, 实现“数据-能源”双网联合^[6-7], 能为电力系统运行增添更多灵活性空间^[8], 缓解高峰时段相关输电线路阻塞, 提升系统整体的可靠性^[9]。当前可再生能源比例上升, 电网随机性波动性增大, 数据中心能很好地发挥需求侧管理作用^[10-13], 维护电力系统安全稳定运行。

现有文献对常规的电力系统运行可靠性评估方法已经进行了非常充分的研究。现有方法通常是基于解析法和蒙特卡洛法及它们的衍生方法^[14-16]。文献[17]考虑电网的多时间尺度特性及多能互济的运行策略, 提出了一种基于蒙特卡洛法的综合能源系统运行可靠性评估方法及其指标体系。文献[18]提出了一种基于解析法的气-电耦合综合能源系统运行可靠性评估模型及其指标体系。文献[19]基于时序蒙特卡洛法提出了一种微电网孤岛运行可靠性快速评估方法。文献[20]基于蒙特卡洛法提出了一种适用于需求响应条件下的电网运行可靠性计算方法。文献[21]在有效掌握故障发生概率随运行时间的变化规律的基础上, 采用蒙特卡洛方法对高压隔离开关进行可靠性分析。虽然现有电力系统运行可靠性评估方法对于常规的电力系统已经非常成熟, 但是数据中心较强的能耗灵活性、逐年攀升的用电占比和高度互联的能耗特性, 会导致现有电力系统运行可靠性评估方法结果不准确。而目前鲜有文献研究考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性评估方法。

随着数据中心大量接入电网, 其高能耗、高弹性和互联互通的能耗特性为其自身和电网的安全可靠运行都将带来前所未有的挑战和机遇, 一方面, 数据中心通常算力负载波动性较大^[22-24], 因此会进行冗余的硬件配置, 例如电商平台会按照“双 11”的算力需求来配置自身的数据中心以应对算力负载尖峰, 导致设备冗余度高、利用率低、能耗高且算力负载波动较强, 对电网可靠运行造成挑战; 另一方面, 低利用率也意味着其能耗调节空间大, 通常大型的通信运营商以及互联网公司常在不同地区布局数据中心^[25], 可通过 DCN 实现其算力负载的异地转移^[26], 能改变电力网络中的负荷分布(在遵循硬件设备允许的运行约束条件下, 算力负载异地转移

可以瞬时实现, 且不会产生额外的成本^[27]), 为维护电网安全稳定运行提供巨大机遇。因此在数据中心大规模接入电网的场景下, 其高能耗、高弹性和互联互通的能耗特性会导致现有电力系统运行可靠性评估方法结果不准确, 现有指标体系不能反映数据中心的能效状态及其对电网运行可靠性影响程度。为保障电力系统安全可靠运行, 有必要建立考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性评估方法。

因此, 本文首先基于数据中心之间的互联互通和算力负载异地转移特性, 提出了数据中心负载灵活性模型; 其次, 从电力系统和数据中心两个角度出发, 建立了包含数据中心能效与运行可靠性贡献等指标的电力系统运行可靠性评估指标体系; 再次, 基于所提出的数据中心负载灵活性模型和运行可靠性指标, 建立了考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性评估模型, 提出对应评估方法; 最后, 通过 IEEE RTS 算例和实际电网算例进行仿真, 结果表明数据中心的负载灵活性不仅有助于可再生能源消纳和电力系统安全可靠运行, 还有助于数据中心节能降耗。

1 基于数据中心互联互通和算力负载异地转移特性的数据中心负载灵活性建模

由于数据中心自身能耗弹性和不同数据中心之间互联互通特性共同作用, 使数据中心在电力系统需求侧具有较大的能耗动态调节空间。但是数据中心的互联互通与算力转移的过程并不是毫无限制的, 其算力在空间维度进行转移的过程中, 会受数据量大小、计算资源上限和网络带宽上限等多个维度的限制。基于此, 本文提出基于数据中心互联互通和算力负载异地转移特性的数据中心负载灵活性建模。

数据中心主要能耗设备有 IT 设备、空调系统和照明系统等^[28-30], 其中前两者占比最高, 通常占 85%, 其他部分功耗相对平稳且占比很小, 因此进行数据中心负载灵活性建模时需要重点考虑 IT 设备和空调系统的能耗, 以及数据中心互联互通和算力负载异地转移特性。

1) 单个 IT 设备的能耗

t 时段第 i 台 IT 设备的能耗可以表示为

$$P_{IT,i}(t) = \begin{cases} [(P_{\max,i} - P_{\text{idle},i})u_i(t) + P_{\text{idle},i}] \cdot (b_1 - b_2 T_{IT,i}(t)) & I_i(t) = 2 \\ P_{\text{sleep}} & I_i(t) = 1 \\ 0 & I_i(t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{\max,i}$ 为第 i 台 IT 设备的满载功率; $P_{\text{idle},i}$ 为第 i 台 IT 设备的静态功率; $u_i(t)$ 为第 i 台 IT 设备在 t 时段的算力占用率; b_1 和 b_2 为漏电常数; $T_{\text{IT},i}(t)$ 为第 i 台 IT 设备在 t 时段的芯片温度; P_{sleep} 为 IT 设备的待机功率; $I_i(t)$ 为第 i 台 IT 设备在 t 时段的状态变量, $I_i(t)$ 取 2、1、0, 分别代表开启、待机和关闭 3 种状态。

2) 单个数据中心的空调系统能耗
 t 时段空调系统的能耗可以表示为

$$P_{\text{aircon}}(t) = \frac{Q_{\text{IT}} + k_{\text{T}} S_{\text{dc}}}{k_{\text{COP}}} \quad (2)$$

式中: k_{COP} 为空调系统的性能系数; Q_{IT} 为 IT 设备的散热量(大多数 IT 设备的生产厂商均能提供 IT 设备的耗电量和散热量, 其散热量约为耗电量的 97%^[31]); k_{T} 为环境温度系数(kW/m^2); S_{dc} 为机房面积。

综上, 单个数据中心总能耗 P_{DC} 和总算力 u_{total} 为

$$\begin{cases} P_{\text{DC}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{IT}}} P_{\text{IT},i}(t) + P_{\text{aircon}}(t) \\ u_{\text{total}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{IT}}} u_i(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中, N_{IT} 为该数据中心的 IT 设备总数。

3) 考虑算力负载异地转移特性的单个数据中心算力平衡方程

t 时段算力需求转移后单个数据中心的算力与算力需求应该相等, 如式(4)所示。

$$\begin{cases} u_{\text{total},k}(t) = D_{\text{IT},k}(t) - \sum_{l=1}^{N_{\text{DC}}} u_{kl}(t) \\ u_{kl}(t) = -u_{lk}(t), k \neq l \end{cases} \quad (4)$$

式中: $u_{\text{total},k}(t)$ 为 t 时段单个数据中心的 IT 设备总算力; $D_{\text{IT},k}(t)$ 为 t 时段数据中心 k 的算力需求; N_{DC} 为数据中心总数; $u_{kl}(t)$ 为 t 时段数据中心 k 转移给数据中心 l 的算力需求。

4) 多个数据中心的总算力平衡方程

t 时段所有数据中心的总算力与总算力需求应该相等, 如式(5)所示。

$$\sum_{k=1}^{N_{\text{DC}}} u_{\text{total},k}(t) = \sum_{k=1}^{N_{\text{DC}}} D_{\text{IT},k}(t) \quad (5)$$

5) 单个数据中心的算力上下限约束

t 时段单个数据中心的 IT 设备总算力应当满足其上下限约束, 如式(6)所示。

$$u_{\text{total},k,\min} \leq u_{\text{total},k}(t) \leq u_{\text{total},k,\max} \quad (6)$$

式中, $u_{\text{total},k,\max}$ 和 $u_{\text{total},k,\min}$ 分别为数据中心 k 所有 IT 设备总算力的上下限。

6) 数据中心之间的算力需求转移上下限约束

$$-u_{kl,\max} \leq u_{kl}(t) \leq u_{kl,\max} \quad (7)$$

式中, $u_{kl,\max}$ 为数据中心 k 与 l 之间算力需求转移的

上限。

综上, 式(1)一式(7)即为本文所建立的数据中心负载灵活性模型, 该模型通过数据中心之间的算力需求转移量 $u_{kl}(t)$, 反映了数据中心之间的互联互通, 可实现数据中心算力负载的异地转移, 为后续电力系统运行可靠性评估提供数据中心模型基础。

2 考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性评估指标体系

电力系统运行可靠性评估结果需要通过定量的指标来度量。随着数据中心的规模越来越大, 其高能耗、高弹性和互联互通的能耗特性对电力系统运行可靠性的影响不容忽视, 而现有电力系统运行可靠性评估指标体系无法反映数据中心能效状态及其对电力系统运行可靠性的影响程度, 难以完全适用。为准确评估考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性, 本节从电力系统和数据中心两个角度出发, 提出考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性评估指标体系, 它包括电力不足期望、切负荷概率、弃风和弃光期望值的传统电力系统运行可靠性指标, 数据中心能效状态指标以及对电力系统运行可靠性贡献系数指标。相较于传统电力系统运行可靠性指标, 本文所提指标体系更全面, 更适用于数据中心大规模接入电网的场景。

1) 系统级运行可靠性指标

系统电力不足期望值(expected demand not supplied, EDNS)(单位 MW)、切负荷概率(probability of load curtailments, PLC)、系统弃风期望值(expected wind power abandoned, EWPA)(单位 MW)以及系统弃光期望值(expected solar power abandoned, ESPA)(单位 MW)指标, 用以反映系统中对负荷的保供水平以及弃风弃光现象严重程度, 其表达式分别为

$$E_{\text{EDNS}} = \sum_{x \in G_E} P(x) C_E(x) \quad (8)$$

$$E_{\text{PLC}} = \sum_{x \in G_E} P(x) \quad (9)$$

$$E_{\text{EWPA}} = \sum_{x \in G_W} P(x) \Delta P_W(x) \quad (10)$$

$$E_{\text{ESPA}} = \sum_{x \in G_S} P(x) \Delta P_S(x) \quad (11)$$

式中: G_E 、 G_W 、 G_S 分别为出现负荷削减、弃风和弃光现象的状态集合; $P(x)$ 为系统状态 x 的概率; $C_E(x)$ 、 $\Delta P_W(x)$ 和 $\Delta P_S(x)$ 分别为系统状态 x 的负荷削减量、弃风量和弃光量。

2) 数据中心能效

为弥补现有电力系统运行可靠性评估指标体系无法反映数据中心能效状态及其对电力系统运行可靠性影响的不足, 本文提出数据中心能效评估指

标, 即平均电能使用效率值(average power usage effectiveness, APUE)。\$t\$ 时段的 APUE 用以衡量时段数据中心能耗效率, 它等于系统中 \$t\$ 时段数据中心总能耗与数据中心的 IT 设备总能耗的比值, 该值越小则 \$t\$ 时段数据中心的能效越佳, 其表达式为

$$E_{\text{APUE}}(t) = \frac{\sum_{k=1}^{N_{\text{DC}}} P_{\text{DC},k}(t)}{\sum_{k=1}^{N_{\text{DC}}} P_{\text{IT},k}(t)} \quad (12)$$

式中, \$P_{\text{DC},k}(t)\$ 和 \$P_{\text{IT},k}(t)\$ 分别为数据中心 \$k\$ 在 \$t\$ 时段的总能耗和 IT 设备总能耗。

3) 数据中心对电力系统运行可靠性贡献指标

数据中心对系统电力不足期望值、切负荷概率、对弃风期望值和对弃光期望值贡献系数(contribution of data center to EDNS/PLC/EWPA/ESPA, CDED/CDPL/CDEW/CDES), 用以反映数据中心负载灵活性对系统运行可靠性指标的贡献度, 它们等于考虑数据中心负载灵活性前后, 系统运行可靠性指标的相对改变量, 其表达式分别为

$$E_{\text{CDED}} = (E_{\text{EDNS}_0} - E_{\text{EDNS}_1}) / E_{\text{EDNS}_0} \quad (13)$$

$$E_{\text{CDPL}} = (E_{\text{PLC}_0} - E_{\text{PLC}_1}) / E_{\text{PLC}_0} \quad (14)$$

$$E_{\text{CDEW}} = (E_{\text{EWPA}_0} - E_{\text{EWPA}_1}) / E_{\text{EWPA}_0} \quad (15)$$

$$E_{\text{CDES}} = (E_{\text{ESPA}_0} - E_{\text{ESPA}_1}) / E_{\text{ESPA}_0} \quad (16)$$

式中, 各系统级指标的下标 0 和 1 分别代表不考虑和考虑数据中心负载灵活性。

3 考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性评估模型和方法

在数据中心大规模接入电网的场景下, 现有的电力系统运行可靠性评估模型和方法并没有考虑数据中心的负载灵活性, 往往导致结果不准确, 因此难以完全适用。本文在数据中心的负载灵活性建模的基础上, 提出了考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性评估模型和方法。

3.1 考虑数据中心负载灵活性的电力系统最小切负荷模型

电力系统运行可靠性评估模型主要包括潮流模型和最小切负荷模型。传统电力系统最小切负荷模型包含潮流方程、节点电压约束等, 本节在此基础上, 进一步引入数据中心运行约束与第 1 节所建立的数据中心负载灵活性约束, 考虑数据中心算力负载异地转移引发电力负荷分布改变特点, 构建计及数据中心负载灵活性的电力系统最小切负荷模型。与传统最小切负荷模型相比, 所建模型的优化变量不仅包含切负荷量、弃风弃光量等, 还包含数据中心的算力转移量。

1) 目标函数

目标函数为最小化电力系统运行总成本 \$C\$, 主要包括负荷用电成本、弃风成本、弃光成本和负荷削减成本, 如式(17)所示。

$$\min \sum_{j=1}^{N_b} [aP_{\text{D},j}(t) + b\Delta P_{\text{W},j}(t) + c\Delta P_{\text{S},j}(t) + dC_{\text{E},j}(t)]\Delta t \quad (17)$$

式中: \$N_b\$ 为电网节点的总数; \$a\$、\$b\$、\$c\$ 和 \$d\$ 分别为负荷用电成本系数、弃风成本系数、弃光成本系数和负荷削减成本系数; \$P_{\text{D},j}(t)\$、\$\Delta P_{\text{W},j}(t)\$、\$\Delta P_{\text{S},j}(t)\$ 和 \$C_{\text{E},j}(t)\$ 分别为 \$t\$ 时段节点 \$j\$ 的有功负荷量、弃风量、弃光量和负荷削减量; \$\Delta t\$ 为间隔时段。

2) 约束条件

(1) 数据中心负载灵活性约束

数据中心负载灵活性约束即第 1 节建立的数据中心负载灵活性模型式(1)一式(7)。

(2) 数据中心运行约束

IT 设备的功率爬坡值应当小于其上限, 如式(18)所示。

$$P_{\text{IT},i|I_i=1}(t) - P_{\text{IT},i|I_i=1}(t-1) \leq R_{\text{IT}} \quad (18)$$

式中: \$P_{\text{IT},i|I_i=2}(t)\$ 为 IT 设备 \$i\$ 处于启动状态时在 \$t\$ 时段的功率, \$t-1\$ 时刻已知; \$R_{\text{IT}}\$ 为爬坡上限值。

IT 设备由停机状态到开机状态所需的最短时间满足式(19)。

$$T_{\text{IT-off},i}(t) \geq T_{\text{IT-off},i \min} \quad (19)$$

式中: \$T_{\text{IT-off},i}(t)\$ 为 IT 设备 \$i\$ 停机时间; \$T_{\text{IT-off},i \min}\$ 为最小停机时间, 通常为 1~2 min。

数据中心运行需满足能量守恒定律。IT 设备达到热平衡状态时, 其发出的热量与入口冷空气热量之和等于出口热空气的热量, 具体见式(20)。式(21)表示空调系统送风冷空气经过传输对流换热后到达 IT 设备入口的热平衡约束。

$$T_{\text{IT},i}(t) = 97\%P_{\text{IT},i}(t)R_{\text{in}} + T_{\text{in},i}(t) \quad (20)$$

$$T_{\text{in},i}(t) = T_{\text{out}}(t) + DP_{\text{IT},i}(t) \quad (21)$$

式中: \$97\%P_{\text{IT},i}(t)\$ 为 IT 设备 \$i\$ 产生的热量; \$R_{\text{in}}\$ 为 IT 设备入口对流换热等效热阻(K/W); \$T_{\text{in},i}(t)\$ 为 IT 设备 \$i\$ 的入口气流温度; \$T_{\text{out}}(t)\$ 为空调系统送风温度; \$D\$ 为传热系数。

IT 设备 \$i\$ 的芯片温度应当小于其上限, 如式(22)所示。

$$T_{\text{IT},i}(t) \leq T_{\text{IT,max}} \quad (22)$$

式中, \$T_{\text{IT,max}}\$ 为芯片温度上限。

制冷与空调工程师学会 ASHRAE 指南规定 IT 设备入口气流温度应当满足其上下限约束, 如式

(23)所示。

$$T_{in,min} \leq T_{in,i}(t) \leq T_{in,max} \quad (23)$$

式中, $T_{in,max}$ 和 $T_{in,min}$ 分别为 IT 设备入口气流温度上下限, 是国际公认的数据中心设计重要参考。

数据中心 i 的空调系统送风温度应当满足其上下限约束, 如式(24)所示。

$$T_{out,min} \leq T_{out,i}(t) \leq T_{out,max} \quad (24)$$

式中, $T_{out,max}$ 和 $T_{out,min}$ 分别为空调系统送风温度上下限, 其值取决于空调的运行参数。

(3) 电网运行约束

电力系统有功、无功平衡约束如式(25)和式(26)所示。

$$V_i(t) \sum_{j=1}^{N_b} V_j(t) (G_{ij} \cos \theta_{ij}(t) + B_{ij} \sin \theta(t)) = \quad (25)$$

$$P_{G,i}(t) - P_{D,i}(t) - P_{total,i}(t), \quad i = 1, 2, \dots, N_b$$

$$V_i(t) \sum_{j=1}^{N_b} V_j(t) (G_{ij} \sin \theta_{ij}(t) - B_{ij} \cos \theta(t)) = \quad (26)$$

$$Q_{G,i}(t) - Q_{D,i}(t), \quad i = 1, 2, \dots, N_b$$

式中: $V_i(t)$ 为 t 时段节点 i 的电压幅值; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵的第 i 行第 j 列元素的实部和虚部; $\theta_{ij}(t)$ 为 t 时段电力系统节点 i 与 j 的电压相角差; $P_{G,i}(t)$ 、 $Q_{G,i}(t)$ 分别为 t 时段电力系统节点 i 的机组有功、无功出力; $P_{D,i}(t)$ 、 $Q_{D,i}(t)$ 和 $P_{total,i}(t)$ 分别为 t 时段电力系统节点 i 的有功负荷、无功负荷和数据中心负荷。

切负荷量 $C_{E,j}(t)$ 、弃风量 $\Delta P_{W,m}(t)$ 和弃光量 $\Delta P_{S,n}(t)$ 应当满足其各自上下限约束, 如式(27)一式(29)所示。

$$0 \leq C_{E,j}(t) \leq P_{D,j}(t), \quad j = 1, 2, \dots, N_b \quad (27)$$

$$0 \leq \Delta P_{W,m}(t) \leq P_{W,m}(t), \quad m = 1, 2, \dots, N_w \quad (28)$$

$$0 \leq \Delta P_{S,n}(t) \leq P_{S,n}(t), \quad n = 1, 2, \dots, N_s \quad (29)$$

式中: $P_{W,m}(t)$ 和 $P_{S,n}(t)$ 分别为风电场 m 和光伏电站 n 的预测可发有功功率; N_w 和 N_s 分别为风电场和光伏电站数量。

电力系统节点电压幅值 $V_j(t)$ 与机组有功出力 $P_{G,i}(t)$ 应当满足其各自的上下限约束, 如式(30)和式(31)所示。

$$V_{j,min} \leq V_j(t) \leq V_{j,max}, \quad j = 1, 2, \dots, N_b \quad (30)$$

$$P_{G,i,min} \leq P_{G,i}(t) \leq P_{G,i,max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_g \quad (31)$$

式中: 下标 max 和 min 分别表征其上下限; N_g 表

示机组的数量。

3.2 考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性评估方法

基于 3.1 节所建立的电力系统运行可靠性评估模型和第 2 节所提出的运行可靠性评估指标, 本节基于蒙特卡洛法, 进一步提出考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性评估方法, 其评估流程如图 1 所示, 记 K 为抽样次数, 具体步骤如下。

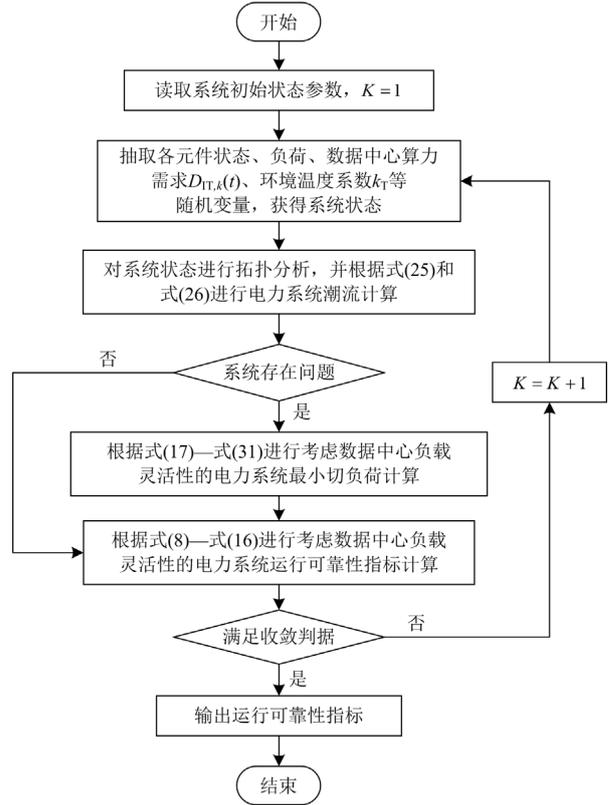


图 1 考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性评估流程图

Fig. 1 Reliability evaluation flowchart of power system operation reliability considering data center load flexibility

1) 状态抽样: 利用蒙特卡洛法对系统元件(发电机组、输电线路、变压器等)状态、负荷、数据中心算力需求 $D_{IT,k}(t)$ 、环境温度系数 k_T 、风电场的有功功率 $P_{W,m}(t)$ 和光伏电站的有功功率 $P_{S,n}(t)$ 等随机变量进行抽样, 由此确定一个系统状态。

2) 拓扑分析与潮流计算: 对抽样得到系统状态进行连通性辨识, 分析系统的节点由支路连接成多少子系统。利用式(25)和式(26)对电力系统进行潮流计算, 判断系统是否存在节点电压越限、线路越限等问题。

3) 最小切负荷计算: 对潮流存在问题的系统, 利用式(17)一式(31)进行考虑数据中心负载灵活性

的最小切负荷计算, 由于 IT 设备 i 状态变量 $I_i(t)$ 的存在, 该问题为混合整数优化问题, 可采用分支定界法^[31]、改进的部分代理割(partial surrogate cuts, PSG)算法^[32]等进行求解, 以计算切负荷量 $C_{E,j}(t)$ 、弃风量 $\Delta P_{W,m}(t)$ 和弃光量 $\Delta P_{S,n}(t)$ 。

4) 运行可靠性指标计算: 基于最小切负荷求解结果, 利用式(8)~式(16)计算考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性指标 EDNS、PLC、EWPA、ESPA、APUE、CDED、CDPL、CDEW 和 CDES。

5) 收敛判断: 以运行可靠性指标的最大方差系数 β 和最大抽样次数 K_{\max} 作为收敛判据, 若满足收敛精度则结束计算; 否则进行下一次抽样, 返回步骤 1)。

4 算例分析

为验证本文所建立指标、模型和方法的有效性, 本节使用 Matlab 软件, 结合国内数据中心能耗情况, 参考国内互联网企业的大型数据中心实际运行数据, 在数据中心能耗占系统总能耗比例相同的前提下, 以 IEEE RTS-24 节点系统和某省实际电网 661 节点系统为例, 进行仿真分析。具体数据中心的参数见附录 A 表 A1—表 A6。

针对测试系统中的不确定性, 本节主要考虑电负荷、线路故障概率、数据中心算力负载、风电场和光伏电站有功功率。进而评估数据中心负载灵活性对电力系统运行可靠性的影响, 包括改善系统弃风、弃光以及负荷削减的程度。由于数据中心实际算例负载、风电场和光伏电站有功功率数据的匮乏, 难以精准刻画其随机特性。因此, 本节假定测试系统中电负荷、数据中心算力负载、风电场和光伏电站有功功率的随机特性均服从正态分布, 其标准差为各自期望值的 5%。并设置抽样收敛判据 $\beta \leq 0.05$, S0 为不考虑数据中心负载灵活性的场景, S1 为考虑数据中心负载灵活性的场景。

4.1 IEEE RTS-24 节点算例分析

IEEE RTS-24 节点系统是电力系统领域中一个经典的可靠性测试系统, 被广泛应用于研究电力系统的运行可靠性。本文对 IEEE RTS-24 节点系统进行了一些改进, 分别在负荷节点 6 接入一个数据中心 B, 在负荷节点 19、20 各接入一个数据中心 A, 以反映现实中数据中心的分布位置。系统拓扑结构图如图 2 所示。测试结果如表 1 所示。

由表 1 可知, S1 场景下, EDNS、PLC、EWPA、ESPA 和 APUE 指标相较于 S0 场景均大幅降低, 降幅分别为 69.4%、87.8%、70.7%、61.9%和 18.6%,

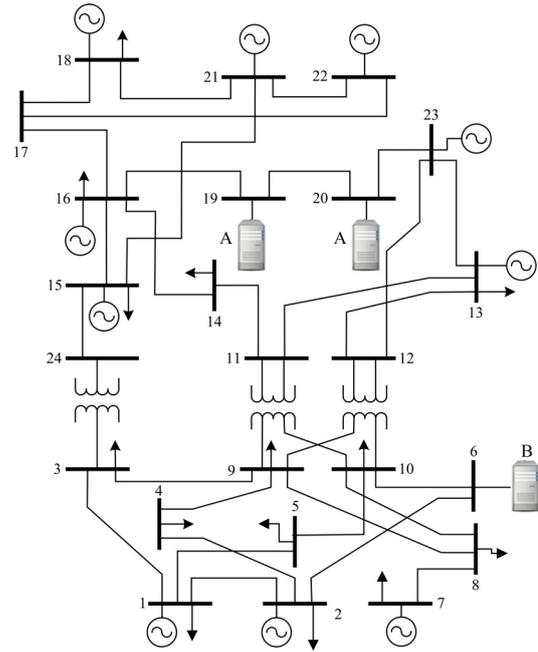


图 2 含有数据中心负荷的 IEEE RTS-24 系统

Fig. 2 IEEE RTS-24 system with data center

表 1 IEEE RTS-24 节点算例测试结果

Table 1 Simulation results of IEEE RTS-24-bus system

场景	S0	S1
EDNS/MW	5.27	1.61
PLC/%	0.33	0.04
EWPA/MW	4.21	1.23
ESPA/MW	2.76	1.05
APUE	1.56	1.27
CDED/%	—	69.4
CDPL/%	—	87.8
CDEW/%	—	70.7
CDES/%	—	61.9

这是由于数据中心利用其负载灵活性实现了工作负载的异地转移, 改变了电力网络中的负荷分布, 一定程度缓解了输电线路阻塞问题。例如 S1 场景中, $K = 2434$ 时, 节点 6 的数据中心将自身 28.4% 的算力需求转移给 20 节点的数据中心, 节点 6 至节点 10 线路由满载 750 MW 降至 464.64 MW, 系统负荷削减量由 3.16 MW 降至 1.33 MW, 提升了系统整体运行可靠性, 同时还改善了数据中心自身的能效和运行状态。但是如果将节点 6 的数据中心直接接入节点 20, 那么系统中数据中心的灵活性将无法实现对负荷分布的调整。因此进行电力系统运行可靠性评估时有必要考虑数据中心负载灵活性, 并且如何规划数据中心在电力系统中的接入, 也是充分利用数据中心灵活性提升系统运行可靠性水平的重要研

究课题。

进一步分析运行可靠性评估的计算时间,表 2 呈现了两种场景下运行可靠性评估的计算时间、抽样次数以及平均时间。由表 2 可知,在 S0 场景下,运行可靠性评估的计算时间为 323 s,抽样次数为 5923 次,平均时间为 0.05 s/次。而在 S1 场景下,这些数值分别为 369 s、6374 次和 0.06 s/次。可以看到,相对于 S0 场景,S1 场景下的计算时间与抽样次数均增加了一些,这是因为 S1 场景考虑了数据中心负载灵活性约束,增加了场景和计算时间。但是平均计算时间非常接近。因此数据中心负载灵活性约束对系统运行可靠性的计算速度有一定影响,但并不是很大。

表 2 运行可靠性计算时间

Table 2 Calculation time of operation reliability of a province

场景	S0	S1
计算时间/s	323	369
抽样次数 K	5923	6374
平均时间/s	0.05	0.06

4.2 某省实际电网 661 节点系统算例分析

参考国内某互联网企业大型数据中心的实际运行数据,结合某省实际数据中心能耗情况,对某省实际电网 661 节点系统进行算例仿真。由于无法精准获得设备故障率等参数,算例中设置线路故障率为 0.2%。测试结果如表 3 所示。

表 3 某省实际电网 661 节点系统算例结果

Table 3 Simulation results of real 661-bus system

场景	S0	S1
EDNS/MW	33.21	4.35
PLC/%	1.48	0.02
EWPA/MW	9.87	2.27
ESPA/MW	7.64	1.35
APUE	1.58	1.28
CDED/%	—	86.9
CDPL/%	—	98.6
CDEW/%	—	77.0
CDES/%	—	82.3

由表 3 可知,S1 场景下,EDNS、PLC、EWPA、ESPA 和 APUE 指标相较于 S0 场景同样均得到了大幅降低,降幅分别为 86.9%、98.6%、77.0%、82.3% 和 19%,且相较于 IEEE9 节点算例结果降幅更大。这说明对于规模更大、结构更复杂的电力系统来说,数据中心的负载灵活性改善系统负荷削减、弃风弃光以及数据中心自身能效的效果会更加显著。这是由于更大规模电网中各数据中心分布范围更广,其负载灵活性更大,能为电力系统运行增添更多灵活

性空间。例如 S1 场景抽样次数为 11 541 时,节点 326 的数据中心 F 通过将自身 31.24%的算力需求转移给节点 12 数据中心 E,节点 326 相连的 3 条线路分别由满载 750 MW 降至 388.64 MW、529.35 MW 和 568.98 MW,大幅缓解了数据中心 F 附近的线路阻塞问题,系统切负荷量由 28.54 MW 降至 5.24 MW,降幅为 81.6%,弃风量由 7.89 MW 降至 2.37 MW,降幅为 70.0%,弃光量由 6.12 MW 降至 2.03 MW,降幅为 66.8%,极大地改善了电力系统切负荷和弃风弃光。

进一步分析运行可靠性评估的计算时间,如表 4 所示。由表 4 可知,S0 场景下,运行可靠性评估计算时间为 1474 s,抽样次数为 26 514 次,平均时间为 0.05 s/次;而 S1 场景下,运行可靠性评估计算时间为 1615 s,抽样次数为 29 110 次,平均时间为 0.06 s/次。相较于 S0,S1 的计算时间有略微增加,仅为 9.5%,可见:在本算例中,数据中心负载灵活性约束虽然对系统运行可靠性的计算速度产生了一定影响,但仍在可接受范围之内。并且相较于小规模算例,大规模电网中数据中心负载灵活性约束对运行可靠性计算速度影响更大。

表 4 运行可靠性计算时间

Table 4 Calculation time of operation reliability evaluation

场景	S0	S1
计算时间/s	1474	1615
抽样次数 K	26 514	29 110
平均时间/s	0.05	0.06

5 结论

数据中心的规模越来越大,其高能耗、高弹性和互联互通的能耗特性对电力系统运行可靠性影响不容忽视,而现有电力系统运行可靠性评估方法以及指标体系没有对其进行考虑。本文首先基于数据中心之间的互联互通和算力负载异地转移特性,提出了数据中心负载灵活性模型;其次建立了包含数据中心能效与运行可靠性贡献等指标的电力系统运行可靠性评估指标体系;然后基于所提出的数据中心负载灵活性模型和运行可靠性指标,建立了考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性评估模型,并提出对应评估方法;最后通过 IEEE 标准算例和实际电网算例进行仿真,结果表明数据中心的负载灵活性不仅有助于可再生能源消纳和电力系统安全可靠运行,还有助于数据中心节能降耗,且对于规模更大、结构更复杂的电力系统效果更明显,验证了本文所提考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性评估方法具有较大现实意义。

附录 A

1) IEEE RTS-24 节点系统数据中心参数

表 A1 数据中心 A 设备参数

Table A1 Equipment parameters of data center A

类型	参数名称	数值
	数量/个	10 000
IT 设备	静态功率 P_{idle}/W	200
	待机功率 P_{th}/W	20
	满载功率 P_{max}/W	500
	爬坡速率 $R_{IT}/(W/s)$	24
	启停成本 $S_i/(元/次)$	0.0149
	运行成本 $F/(元/kWh)$	1.2
空调系统	单台设备投影面积 S/m^2	5
	等效热阻 $R_m/(K/W)$	0.0147
	传热系数 $D/(K/W)$	0.0326
机房环境	机房总面积/ m^2	500 000
	环境温度系数 k_T	0.18

表 A2 数据中心 B 设备参数

Table A2 Equipment parameters of data center B

类型	参数名称	数值
	数量/个	15 000
IT 设备	静态功率 P_{idle}/W	250
	待机功率 P_{th}/W	25
	满载功率 P_{max}/W	710
	爬坡速率 $R_{IT}/(W/s)$	26
	启停成本 $S_i/(元/次)$	0.0120
	运行成本 $F/(元/kWh)$	1.2
空调系统	单台设备投影面积 S/m^2	5
	等效热阻 $R_m/(K/W)$	0.0147
	传热系数 $D/(K/W)$	0.0326
机房环境	机房总面积/ m^2	750 000
	环境温度系数 k_T	0.18

2) 某省实际电网 661 节点系统数据中心参数

表 A3 数据中心 C 设备参数

Table A3 Equipment parameters of data center C

类型	参数名称	数值
	数量/个	100 000
IT 设备	静态功率 P_{idle}/W	200
	待机功率 P_{th}/W	20
	满载功率 P_{max}/W	500
	爬坡速率 $R_{IT}/(W/s)$	24
	启停成本 $S_i/(元/次)$	0.0149
	运行成本 $F/(元/kWh)$	1.2
空调系统	单台设备投影面积 S/m^2	5
	等效热阻 $R_m/(K/W)$	0.0147
	传热系数 $D/(K/W)$	0.0326
机房环境	机房总面积/ m^2	500 000
	环境温度系数 k_T	0.18

表 A4 数据中心 D 设备参数

Table A4 Equipment parameters of data center D

类型	参数名称	数值
	数量/个	150 000
IT 设备	静态功率 P_{idle}/W	250
	待机功率 P_{th}/W	25
	满载功率 P_{max}/W	710
	爬坡速率 $R_{IT}/(W/s)$	26
	启停成本 $S_i/(元/次)$	0.0120
	运行成本 $F/(元/kWh)$	1.2
空调系统	单台设备投影面积 S/m^2	5
	等效热阻 $R_m/(K/W)$	0.0147
	传热系数 $D/(K/W)$	0.0326
机房环境	机房总面积/ m^2	750 000
	环境温度系数 k_T	0.18

表 A5 数据中心 E 设备参数

Table A5 Equipment parameters of data center E

类型	参数名称	数值
	数量/个	200 000
IT 设备	静态功率 P_{idle}/W	150
	待机功率 P_{th}/W	18
	满载功率 P_{max}/W	600
	爬坡速率 $R_{IT}/(W/s)$	24
	启停成本 $S_i/(元/次)$	0.0109
	运行成本 $F/(元/kWh)$	1.2
空调设备	单台设备投影面积 S/m^2	6
	等效热阻 $R_m/(K/W)$	0.0147
	传热系数 $D/(K/W)$	0.0326
机房环境	机房总面积/ m^2	500 000
	环境温度系数 k_T	0.18

表 A6 数据中心 F 设备参数

Table A6 Equipment parameters of data center F

类型	参数名称	数值
	数量/个	250 000
IT 设备	静态功率 P_{idle}/W	210
	待机功率 P_{th}/W	21
	满载功率 P_{max}/W	650
	爬坡速率 $R_{IT}/(W/s)$	21
	启停成本 $S_i/(元/次)$	0.0112
	运行成本 $F/(元/kWh)$	1.2
空调设备	单台设备投影面积 S/m^2	5.5
	等效热阻 $R_m/(K/W)$	0.0147
	传热系数 $D/(K/W)$	0.0326
机房环境	机房总面积/ m^2	750 000
	环境温度系数 k_T	0.18

参考文献

- [1] 中投产业研究院. 2021-2025年中国数据中心建设深度调研及投资前景预测报告[R/OL]. [2021-05-11]. <http://www.ocn.com.cn/reports/1892shujuzhongxin.shtml>
- [2] 中国信息通信研究院. 数据中心白皮书(2022年)[R/OL]. [2020-12-11]. <http://www.caict.ac.cn/>
- [3] 周吟雨, 董厚琦, 曾博, 等. 考虑灵活性潜力的互联网数据中心与配电网双层协同规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 49-59.
ZHOU Yinyu, DONG Houqi, ZENG Bo, et al. Bi-level approach to internet data-center and distribution network collaborative planning considering the potential of flexibilities[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 49-59.
- [4] 朱灿元, 杨超, 李舒涛, 等. 考虑清洁能源与储能的分分布式数据中心低碳调度策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(2): 16-23.
ZHU Canyuan, YANG Chao, LI Shutao, et al. Low-carbon scheduling strategy for distributed data centers considering clean energy and energy storage[J]. Smart Power, 2023, 51(2): 16-23.
- [5] 朱一昕, 王靖芸, 毕恺韬, 等. 基于随机模型预测控制的数据中心微电网能量优化调度研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(8): 102-108.
ZHU Yixin, WANG Jingyun, BI Kaitao, et al. Energy optimization dispatch of data center microgrid based on stochastic model predictive control[J]. Smart Power, 2022, 50(8): 102-108.
- [6] 孙湛冬, 焦娇, 李伟, 等. 基于改进蚁群算法的电力云数据中心任务调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 95-101.
SUN Zhandong, JIAO Jiao, LI Wei, et al. A task scheduling strategy for a power cloud data center based on an improved ant colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 95-101.
- [7] 马晓燕, 穆云飞, 李树荣, 等. 数据中心综合能源系统优化运行研究综述[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 1-13.
MA Xiaoyan, MU Yunfei, LI Shurong, et al. Review on the optimal operation of integrated energy system in data center[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 1-13.
- [8] 曹雨洁, 丁肇豪, 王鹏, 等. 能源互联网背景下数据中心与电力系统协同优化(二): 机遇与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(10): 3512-3527.
CAO Yujie, DING Zhaohao, WANG Peng, et al. Coordinated operation for data center and power system in the context of energy internet (II): opportunities and challenges[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3512-3527.
- [9] U.S. Department of Energy. Designing and managing data centers for resilience: demand response and microgrids[R]. 2019.
- [10] 王晴, 刘友波, 黄杨, 等. 考虑数据中心需求响应的城市电网阻塞管理[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3129-3138.
WANG Qing, LIU Youbo, HUANG Yang, et al. Congestion management of urban power grid considering demand response of data center[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3129-3138.
- [11] 王彬. 考虑需求侧响应的含大规模新能源电力系统优化运行研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
WANG Bin. Power system optimal operation with large scale renewable generation integrated considering demand side response[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017.
- [12] 秦琨晗. 面向主动配电网的柔性负荷聚合建模及其调控策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
QIN Junhan. Study on the flexible load aggregation modeling and control strategy for active distribution network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [13] 孙强, 孙志凰, 潘杭萍, 等. 考虑多种储能的数据中心综合能源系统配置优化[J]. 中国电力, 2022, 55(9): 1-7.
SUN Qiang, SUN Zhihuang, PAN Hangping, et al. Configuration optimization of integrated energy system for data center considering multiple energy storage facilities[J]. Electric Power, 2022, 55(9): 1-7.
- [14] 严竹菁. 电-气综合能源系统中的配电网运行可靠性评估[D]. 南京: 东南大学, 2020.
YAN Zhujing. Evaluation of operation reliability of distribution network in electric-gas integrated energy system[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [15] 马天祥, 段昕, 卢志刚, 等. 计及供电可靠性评估的地区电网风储电站选址定容方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(7): 36-43.
MA Tianxiang, DUAN Xin, LU Zhigang, et al. Optimal siting and sizing method of wind storage power station in regional power grid considering power supply reliability assessment[J]. Smart Power, 2021, 49(7): 36-43.
- [16] 陈凡, 张继聪, 赵美莲, 等. 考虑负荷重分配攻击的电力系统运行可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 160-168.
CHEN Fan, ZHANG Jicong, ZHAO Meilian, et al. Operational reliability evaluation for power systems considering load redistribution attack[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 160-168.
- [17] 吕佳炜, 张沈习, 程浩忠. 计及热惯性和运行策略的综合能源系统可靠性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 9-16.
LÜ Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong. Reliability evaluation of integrated energy system considering thermal

- inertia and operation strategy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(20): 9-16.
- [18] 陈娟伟, 余涛, 许悦, 等. 气电耦合综合能源系统供电可靠性评估解析算法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(24): 59-66.
CHEN Juanwei, YU Tao, XU Yue, et al. Analytic method for power supply reliability assessment of electricity-gas coupled energy system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(24): 59-66.
- [19] 张杰, 管霖, 黄振琳. 基于几何分布的微电网孤岛运行可靠性快速概率评估[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(20): 24-30.
ZHANG Jie, GUAN Lin, HUANG Zhenlin. Geometric distribution based fast probabilistic evaluation of islanded operation reliability of microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(20): 24-30.
- [20] 雷敏, 魏务卿, 曾进辉, 等. 考虑需求响应的负荷控制对供电可靠性影响分析[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(10): 53-59.
LEI Min, WEI Wuqing, ZENG Jinhui, et al. Effect of load control on power supply reliability considering demand response[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(10): 53-59.
- [21] 张赛鹏, 冯世涛, 赵春明, 等. 基于威布尔分布和蒙特卡洛法的高压隔离开关可靠性研究[J]. *高压电器*, 2021, 57(6): 86-93, 101.
ZHANG Saipeng, FENG Shitao, ZHAO Chunming, et al. Study on reliability of high voltage disconnecter based on Weibull distribution and Monte Carlo method[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(6): 86-93, 101.
- [22] 王继业, 周碧玉, 张法, 等. 数据中心能耗模型及能效算法综述[J]. *计算机研究与发展*, 2019, 56(8): 3-19.
WANG Jiye, ZHOU Biyu, ZHANG Fa, et al. Data center energy consumption models and energy efficient algorithms[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2019, 56(8): 3-19.
- [23] 翟少磊, 张学志, 段怡, 等. 基于交直流微电网的智慧能源站拓扑结构研究[J]. *智慧电力*, 2021, 49(5): 28-34.
ZHAI Shaolei, ZHANG Xuezhi, DUAN Yi, et al. Topology structure of smart energy station based on AC/DC microgrid[J]. *Smart Power*, 2021, 49(5): 28-34.
- [24] 卢子敬, 邓艺欣, 蒋霖, 等. “东数西算”背景下大型数据中心建设对电网规划的影响研究[J]. *全球能源互联网*, 2022, 5(6): 552-562.
LU Zijing, DENG Yixin, JIANG Lin, et al. Research on the influence of large-scale data center construction on power grid planning under the background of east digital west computing[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2022, 5(6): 552-562.
- [25] 揭秘谷歌数据中心[EB/OL]. [2015-05-11]. https://www.guancha.cn/america/2015_05_11_319077.shtml.
- [26] WEN Yonggang. A survey on data center networking (DCN): infrastructure and operations[J]. *Communications Surveys & Tutorials*, 2017.
- [27] 吴刚. 考虑负荷转移特性的数据中心参与电网规划运行研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
WU Gang. Research on data center participating in power grid planning and operation considering load transfer characteristics[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [28] 黄义成. 数据中心空调系统能耗分析[J]. *智能建筑*, 2014(10): 52-55.
HUANG Yicheng. Analysis of energy consumption of air conditioning system in data center[J]. *Intelligent Building*, 2014(10): 52-55.
- [29] 高晋坤, 余娟, 刘珏麟, 等. 考虑多时段设备耦合的数据中心能效优化方法[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(15): 153-161.
GAO Jinkun, YU Juan, LIU Juelin, et al. Optimization method for energy efficiency of data center considering multi-period equipment coupling[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(15): 153-161.
- [30] 李勃, 王建民, 段炎斐. 新基建: 大数据中心时代[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.
- [31] 赵晋泉, 刘绪, 林昌年, 等. 单相光伏大量接入的三相不平衡配电网无功优化[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(13): 13-18, 70.
ZHAO Jinquan, LIU Xu, LIN Changnian, et al. Three-phase unbalanced reactive power optimization for distribution systems with a large number of single phase solar generators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(13): 13-18, 70.
- [32] 陈鸿琳, 刘明波. 交流潮流约束机组组合的部分代理制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(9): 2540-2550.
CHEN Honglin, LIU Mingbo. Partial surrogate cuts approach for alternating current power flow constrained unit commitment[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(9): 2540-2550.

收稿日期: 2023-04-03

作者简介:

王辉东(1974—), 男, 硕士, 主要从事电力系统自动化工程及技术研究; E-mail: 18244891@qq.com

高晋坤(1998—), 男, 硕士, 主要研究方向为数据中心能效优化、电力系统等值; E-mail: gaojinkun980111@qq.com

余娟(1980—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为电力与能源经济优化运行、风险评估、深度学习。E-mail: yujuancqu@cqu.edu.cn

(编辑 周金梅)