

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191166

面向泛在电力物联网的分布式云数据中心优化选址

张子仪, 蔡泽祥, 郭采珊, 孙宇嫣, 曾兴

(华南理工大学, 广东 广州 510641)

摘要: 泛在电力物联网是应对海量综合能源设备、数据和业务计算负荷的关键, 云计算是泛在电力物联网的关键技术。云数据中心是云计算架构核心, 云数据中心选址对云计算性能意义重大。变电站是能量流、业务流和信息流的核心节点, 且有建设数据中心的有利资源, 分布式架构可以高效利用变电站资源。因此, 基于变电站建设多站融合的分布式云数据中心是支持泛在电力物联网的有效方式。首先考虑能量流、业务流和信息流的关系, 分析变电站特性, 提出基于变电站的分布式云计算架构。然后针对该架构提出云数据中心优化选址策略。最后基于案例对优化选址策略进行仿真, 证明了优化策略的有效性。

关键词: 泛在电力物联网; 云数据中心; 变电站; 分布式架构; 优化选址

Optimization of distributed cloud computing data center layout for ubiquitous power internet of things

ZHANG Ziyi, CAI Zexiang, GUO Caishan, SUN Yuyan, ZENG Xing
(South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Ubiquitous Power Internet of Things (UPIoT) is the key to cope with the massive devices, data and application computing workloads of integration energy and cloud computing is key technique of UPIoT. Cloud data centers are the cores in cloud computing architecture, and cloud data center layout is crucial to cloud computing performance. Substations are core nodes of energy flow, application flow and information flow and have favorable resources for data center construction. The distributed architecture utilizes substation resources efficiently. Therefore, constructing multi-station integration distributed cloud data centers based on substations is an effective method to support UPIoT. Firstly, considering the relation of energy flow, application flow and information flow, substation characteristics are analyzed, and the distributed cloud computing architecture based on substations is proposed. Then, cloud data center layout optimization strategy for this architecture is presented. Finally, the strategy is analyzed by simulation based on case study and is proved effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577073) and Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2016A030313476).

Key words: ubiquitous power internet of things; cloud data center; substation; distributed architecture; layout optimization

0 引言

泛在电力物联网(Ubiquitous Power Internet of Things, UPIoT)能够实现综合能源设备泛在接入, 为海量异构信息的泛在感知和高效处理提供平台, 为综合能源业务的有效开展提供支撑^[1-2], 推动“能量流”、“信息流”和“业务流”的深度耦合^[3]。云计算是泛在电力物联网的核心技术, 为综合能源业务提供核心计算平台^[4-8]。云数据中心是云计算架构的

核心, 是最重要的基础设施^[9], 体现云计算的数据处理能力。云数据中心的选址会影响数据中心性能, 进而对云计算的经济性和可靠性等指标有重要影响^[10], 研究云数据中心优化选址意义重大。其中, 运行成本、建设成本和云计算业务特性等因素是云数据中心优化选址研究考虑的关键因素。

国家电网公司工作报告中提出探索利用变电站资源建设数据中心的“三站合一”新模式, 这种基于变电站的多站融合能够提高资源利用效率, 促进数据的交换共享^[11], 是泛在电力物联网背景下云数据中心建设的重要方式。变电站资源有助于提升供电可靠性和降低成本, 且变电站是业务和信息的枢

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51577073); 广东省自然科学基金项目资助(2016A030313476)

组, 在变电站建设数据中心可以提升云计算性能。此外, 相比于集中式架构, 由分布式数据中心构成的分布式云计算架构能够高效利用分布式资源就近提供服务, 有更好的服务性能和经济性^[12-13], 更适用于考虑分布式变电站资源的云计算系统。因此, 基于变电站的分布式云计算架构是面向泛在电力物联网开展云数据中心优化选址研究的重要对象。

目前针对分布式云数据中心优化选址已经有了许多研究成果, 文献[14]考虑设备投资成本和通信网络成本, 提出了以最小建设成本为目标的服务器优化选址策略。文献[15]对可再生能源出力、建设成本和运行成本进行建模, 并提出了实现新能源利用率和成本协同优化的数据中心选址策略。文献[16]在考虑新能源利用率和数据中心运行成本的基础上增加了对通信延时和服务质量的分析, 构建了较为全面的云数据中心选址定量问题模型。上述文献的研究方法如下: 首先对资源、成本和业务特性等研究中考虑的条件进行分析建模, 作为进一步研究的前提; 然后提出优化选址策略, 构建优化问题模型, 包括优化变量、约束条件和目标函数, 并提出问题求解方法; 最后结合案例进行仿真分析, 对提出的优化选址策略进行验证。

上述文献为本文的研究提供了参考, 但是并未结合电力系统进行研究。本文首先定义综合能源节点概念, 并分析泛在电力物联网背景下电力系统能量流、业务流和信息流的耦合特性。然后对变电站的核心节点属性以及变电站建设数据中心的有利资源进行了分析。在以上分析基础上提出了基于变电站的分布式云计算架构。针对该架构, 提出了以总成本最优为目标的云数据中心优化选址策略; 考虑综合能源业务特性, 建立了综合能源节点模型、变电站模型和优化选址问题模型。最后结合案例对优化选址策略进行仿真分析, 验证了策略的有效性。

1 基于变电站的分布式云计算架构的提出

1.1 泛在电力物联网背景下电力系统基本架构

为了说明本文研究所考虑的电力系统基本架构, 首先定义综合能源节点概念。与传统电力系统相比, 泛在电力物联网背景下综合能源设备泛在接入, 电力系统中的设备、站点更加复杂。因此, 结合文献[17]中“能源环节”概念定义综合能源节点, 如图1所示。综合能源节点是与综合能源业务紧密相关的大型综合能源节点, 节点特性体现综合能源业务特性。综合能源节点包括冷热电联供单元、汽车充电站、微电网、住宅小区和工业园区等。变电站也具有综合能源节点属性, 但为了突出变电站

的特殊特性, 在图1中对其单独列出。泛在电力物联网背景下, 设备与信息深度融合^[18-19], 电力系统呈现信息网络和能量网络统一特性。本文将电力系统简化为由综合能源节点和变电站构成的系统, 综合能源节点和变电站都同时具有能量、业务和信息属性, 能量流、业务流和信息流相互耦合。

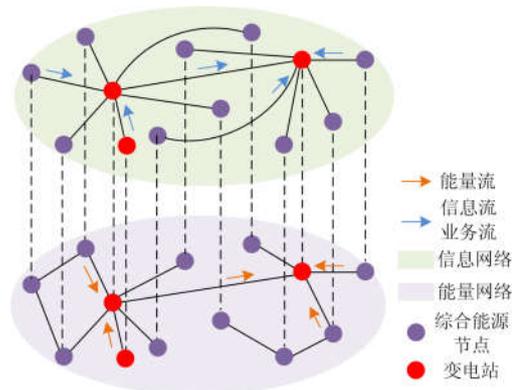


图1 泛在电力物联网背景下电力系统基本架构

Fig. 1 Basic power system architecture under ubiquitous power internet of things background

1.2 变电站特性分析

变电站是电力系统能量交换和能量流汇集的枢纽, 根据能量流、信息流和业务流的耦合特性, 变电站也是电力系统信息汇集的和综合能源业务开展的枢纽。在传统电力自动化架构下, 变电站采集关键信息, 支撑高级应用, 是电网的重要节点^[20]。泛在电力物联网背景下电力系统能量网络基本架构未发生改变, 变电站保持能量交换枢纽地位。相比其他综合能源节点, 变电站汇集的信息更加海量多样, 涉及的综合能源业务更多。新形势下, 变电站同样保持了能量流、信息流和业务流的核心节点地位。

作为能量交换枢纽, 变电站具有支持云数据中心运行的有利资源。由于能量枢纽地位, 相比于配电网末端的用户侧, 变电站供电条件更加优越; 并且变电站可以利用站内电力资源为数据中心供电, 无需以工业电价购电, 因此变电站供电成本低且可靠性高。此外, 变电站是发电侧并网的重要节点, 用于新能源电力并网的变电站能够利用新能源电力为数据中心供电, 而低边际成本新能源电力的利用能够有效降低数据中心的运行成本^[21-24]。变电站中的场地、机房、基础设施等资源也为云数据中心的建设提供了便利, 但是由于空间、环境、运维难度等限制, 单个变电站建设数据中心的资源是有限的。

1.3 基于变电站的分布式云计算架构

由于变电站是能量流、业务流和信息流的核心,

并且有建设数据中心的有利资源，同时考虑到分布式架构的优势，本文提出基于变电站的分布式云计算架构，如图 2 所示。该架构下，通过在变电站建设数据中心，将云计算资源下沉到业务密集处，能够就近完成业务处理，提升云计算性能。同时通过在变电站中进行云数据中心优化选址，实现对多个分布式变电站资源的整合利用，可以提高云数据中心供电可靠性并实现成本优化。

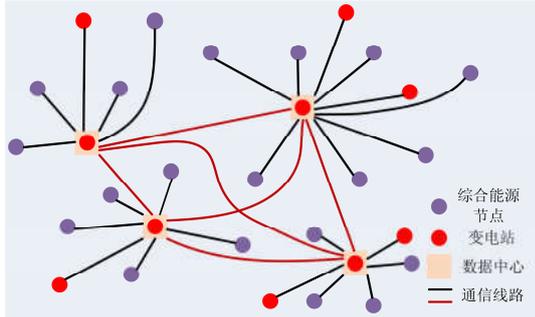


图 2 基于变电站的分布式云计算架构

Fig. 2 Distributed cloud computing based on substations

根据文献[1-2]中提出的泛在电力物联网“感知-接入-网络-平台”层次，对该架构进行进一步定义。综合能源节点作为大型综合能源站点，内部集成了海量的综合能源设备，因此一个综合能源节点内部包括了“感知层”和“接入层”。该架构不考虑综合能源节点内部的信息感知和接入过程，只研究综合能源节点外特性，即一个大型综合能源节点的综合能源业务信息和计算负荷对云数据中心的要求。综合能源节点之间的通信代表“网络层”，主要通过光纤实现数据大容量远距离传输。云数据中心体现“平台层”功能，支持数据处理和综合能源业务开展。

本文基于该架构研究云数据中心优化选址时设定以下原则。1) 云数据中心只能在变电站中进行选址。2) 所有综合能源节点和未建设数据中心的变电站都与某一个特定数据中心相连。3) 为了提升故障响应能力，数据中心之间存在通信互联。4) 本文不考虑负荷在数据中心之间的大规模迁移，一个数据中心除了要满足建设该数据中心的变电站的综合能源业务要求外，还要满足所有与其相连的综合能源节点和变电站的业务要求。

2 云数据中心优化选址策略

本文提出的云数据中心优化选址策略如图 3 所示。首先对变电站和综合能源节点进行建模，模型主要包括变电站资源和综合能源业务特性。其次，基于以上模型构建优化选址问题模型。设定优化变

量，包括数据中心选址和通信网络连接关系；构建变电站资源约束并基于 1.3 节中相关原则构建通信网络约束；建立以总成本最小为目标的目标函数。最后，对优化问题模型线性化并编程求解优化变量值，进而得到云数据中心优化选址方案。

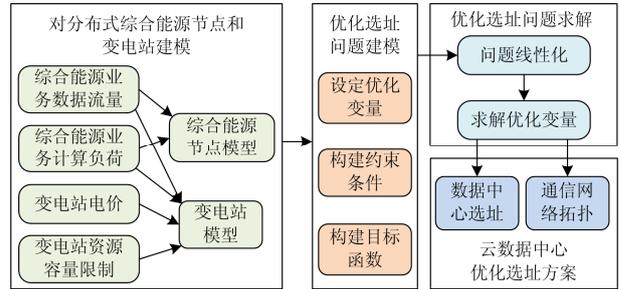


图 3 云数据中心优化选址策略

Fig. 3 Cloud data center layout optimization strategy

2.1 综合能源节点模型

综合能源节点模型包括综合能源业务模型，用业务产生的数据流量和计算负荷表示，体现综合能源节点对数据中心存储和计算能力的要求。

$N = \{n_1, n_2, \dots\}$ ，综合能源节点的集合。

α_{ni} 为节点 $n_i \in N$ 的业务计算负荷。

β_{ni} 为节点 $n_i \in N$ 的业务数据流量。

2.2 变电站模型

变电站模型除了综合能源业务模型，还包括变电站的资源限制和节点电价。

$P = \{p_1, p_2, \dots\}$ 变电站的集合。

α_{pi} 为变电站 $p_i \in P$ 的业务计算负荷。

β_{pi} 为变电站 $p_i \in P$ 的业务数据流量。

ep_{pi} 为变电站 $p_i \in P$ 的节点电价。

L_{Cpi} 为变电站 $p_i \in P$ 的计算设备部署上限。

L_{Spi} 为变电站 $p_i \in P$ 的存储设备部署上限。

2.3 云数据中心优化选址问题模型

2.3.1 优化变量

优化变量包括数据中心选址位置和通信网络拓扑连接，反映云数据中心的优化选址方案。

s_{pi} 反映数据中心选址位置的 0-1 变量，如果变电站 p_i 建设数据中心，该优化变量取 1。

$a_{pi,nj}$ 反映综合能源节点与数据中心连接关系的 0-1 变量，如果变电站 p_i 建设数据中心且 p_i 和 n_j 相连，该优化变量取 1。

$b_{pi,pj}$ 反映变电站与数据中心连接关系的 0-1 变量，如果变电站 p_i 建设数据中心， p_j 未建设数据中

心, 且 p_i 和 p_j 相连, 该优化变量取 1。

c_{p_i, p_j} 反映数据中心通信互联的 0-1 变量, 如变电站 p_i 和 p_j 都建设数据中心, 该优化变量取 1。

2.3.2 目标函数

目标函数为总成本最小, 如式(1)所示。

$$\min (C_o + C_c) \quad (1)$$

式中: C_o 代表运行成本; C_c 代表建设成本。

1) 运行成本

综合能源节点没有建设数据中心的变电站和建有数据中心的变电站都有综合能源业务处理需求, 都会导致数据中心产生运行成本, 这三类节点产生的运行成本分别如式(2)一式(4)所示。

$$C_{o1} = \sum_{p_i \in P} \sum_{n_j \in N} a_{p_i, n_j} e p_{p_i} \omega (\alpha_{n_j} \eta + \beta_{n_j} \rho \varepsilon) t \quad (2)$$

$$C_{o2} = \sum_{p_i \in P} \sum_{p_j \in P} b_{p_i, p_j} e p_{p_i} \omega (\alpha_{p_j} \eta + \beta_{p_j} \rho \varepsilon) t \quad (3)$$

$$C_{o3} = \sum_{p_i \in P} s_{p_i} e p_{p_i} \omega (\alpha_{p_i} \eta + \beta_{p_i} \rho \varepsilon) t \quad (4)$$

式中: ω 、 η 、 ρ 、 ε 和 t 为给定的常数。 ω 代表数据中心能源使用效率, 是数据中心总用电功率与数据中心 IT 设备用电功率的比值; η 代表处理器处理单位数量计算负荷的运行功率, 由处理器性能决定; ρ 代表数据在数据中心的存储时间, 由综合能源业务要求决定; ε 代表存储设备存储单位数量数据的运行功率, 由存储设备性能决定; t 代表数据中心的运行寿命, 由设计规划决定。

总的运行成本为

$$C_o = C_{o1} + C_{o2} + C_{o3} \quad (5)$$

2) 建设成本

建设成本包括通信网络的建设成本和数据中心的建设成本。通信网络建设成本包括综合能源节点与数据中心之间网络的成本、未建设数据中心的变电站与数据中心之间网络的成本和数据中心之间互联网络的成本, 分别如式(6)一式(8)所示。

$$C_{c1} = \sum_{p_i \in P} \sum_{n_j \in N} a_{p_i, n_j} D_{p_i, n_j} \lambda \quad (6)$$

$$C_{c2} = \sum_{p_i \in P} \sum_{p_j \in P} b_{p_i, p_j} D_{p_i, p_j} \lambda \quad (7)$$

$$C_{c3} = \frac{1}{2} \sum_{p_i \in P} \sum_{p_j \in P} c_{p_i, p_j} D_{p_i, p_j} \lambda \quad (8)$$

式中: λ 为单位长度通信网络建设成本, 所有通信都采用光纤, λ 的取值相同; D 为两站点之间的距离。

数据中心建设成本分为只与数据中心数量有关的固定建设成本和与数据中心计算、存储能力相关的容量成本。由于云数据中心选址方案不改变综合能源业务总的计算、存储需求, 因此选址方案与容

量成本无关。仅考虑固定建设成本, 如式(9)所示。

$$C_{c4} = \sum_{p_i \in P} s_{p_i} \varphi \quad (9)$$

式中, φ 为建设一个数据中心的固定建设成本。

总的建设成本为

$$C_c = C_{c1} + C_{c2} + C_{c3} + C_{c4} \quad (10)$$

2.3.3 约束条件

1) 数据中心数量约束如式(11)所示。

$$1 \leq \sum_{p_i \in P} s_{p_i} \leq num_p \quad (11)$$

式中, num_p 为变电站总数。

2) 通信网络连接约束

每一个综合能源节点都与一个数据中心相连, 约束如式(12)和式(13)所示。

$$0 \leq a_{p_i, n_j} \leq s_{p_i}, p_i \in P, n_j \in N \quad (12)$$

$$\sum_{p_i \in P} a_{p_i, n_j} = 1, n_j \in N \quad (13)$$

未建设数据中心的变电站与一个数据中心相连, 约束如式(14)和式(15)所示。

$$0 \leq b_{p_i, p_j} \leq \frac{1}{2}(s_{p_i} - s_{p_j} + 1), p_i \in P, p_j \in P \quad (14)$$

$$\sum_{p_i \in P} b_{p_i, p_j} = (1 - s_{p_j}), p_j \in P \quad (15)$$

数据中心之间通信互联, 约束如式(16)所示。

$$(s_{p_i} + s_{p_j} - 1) \leq c_{p_i, p_j} \leq \frac{1}{2}(s_{p_i} + s_{p_j}) \quad (16)$$

式(16)中满足 $p_i \in P, p_j \in P$ 。

3) 变电站资源约束

变电站计算资源约束如式(17)所示。

$$\left(\sum_{n_j \in N} a_{p_i, n_j} \alpha_{n_j} + \sum_{p_j \in P} b_{p_i, p_j} \alpha_{p_j} \right) \leq (L_{Cp_i} - \alpha_{p_i}) \quad (17)$$

变电站存储资源约束如式(18)所示。

$$\left(\sum_{n_j \in N} a_{p_i, n_j} \beta_{n_j} \rho + \sum_{p_j \in P} b_{p_i, p_j} \beta_{p_j} \rho \right) \leq (L_{Sp_i} - \beta_{p_i} \rho) \quad (18)$$

式(17)和(18)中满足 $p_i \in P$ 。

2.4 优化问题求解

针对本文所提出的云计算架构的云数据中心优化选址问题模型, 在本节中已经被表示成一个整数线性规划(Integer Linear Programming, ILP)问题模型, 可以在 Matlab 中通过 YALMIP 工具箱对问题进行编程和建模, 并调用 CPLEX 求解器进行求解。

3 案例分析

3.1 参数设置

本文设定一个包含 16 个综合能源节点和 8 个变电站的电力系统案例进行仿真, 综合能源节点包括

住宅小区、工业园区、新能源汽车充电站、微电网和冷热电联供系统。变电站包括大型枢纽变电站和光伏电站、风电场的并网变电站。案例参数如表 1、表 2 和表 3 所示。

以上案例参数根据综合能源业务特性、目前互
表 1 综合能源节点参数

Table 1 Parameters of integrated energy nodes

节点编号	α_m / MIPS	β_m / Mbps	节点类型
1	305×10^3	500	住宅小区
2	610×10^3	1 000	住宅小区
3	475×10^3	780	住宅小区
4	365×10^3	600	住宅小区
5	550×10^3	900	住宅小区
6	535×10^3	875	住宅小区
7	285×10^3	350	工业园区
8	165×10^3	200	工业园区
9	325×10^3	400	工业园区
10	365×10^3	450	工业园区
11	395×10^3	160	汽车充电站
12	370×10^3	150	汽车充电站
13	370×10^3	150	汽车充电站
14	610×10^3	400	微电网
15	530×10^3	350	微电网
16	570×10^3	200	冷热电联供

表 2 变电站参数

Table 2 Parameters of substations

编号	$\alpha_{pi} / \text{MIPS}$	β_{pi} / Mbps	$ep_{pi} / (\text{¥/kW}\cdot\text{h})$	L_{Cpi} / MIPS	L_{Spi} / PB
1	305×10^3	500	0.5	15×10^6	45
2	610×10^3	1 000	0.5	12×10^6	37
3	475×10^3	780	0.5	14×10^6	40
4	365×10^3	600	0.15	6.2×10^6	20
5	550×10^3	900	0.15	5.2×10^6	18
6	535×10^3	875	0.15	5.0×10^6	16
7	285×10^3	350	0.2	7.8×10^6	25
8	165×10^3	200	0.2	6.8×10^6	22

表 3 常数值

Table 3 Value of constants

常数	数值	说明
ρ	365/天	基于综合能源业务要求
η	$2.9 \times 10^{-5} / (\text{kW/MIPS})$	基于 Intel 至强金牌系列
ε	$3.75 \times 10^{-10} / (\text{kW/Mbit})$	基于 PB 级硬盘性能
φ	$1 \times 10^6 / \text{¥}$	基于工程建设案例
λ	7 000/(¥/km)	基于工程建设案例
ω	1.8	基于数据中心平均水平

联网云数据中心设备参数和工程建设经验进行设置。每秒百万指令数(Million Instruction Per Second, MIPS)是描述云数据中心计算负荷的有效指标^[25], 因此本文采用 MIPS 来表示综合能源业务计算负荷和云数据中心计算资源。每秒百万比特(Million bit per second, Mbps)可以描述电力系统业务信息^[26], 本文用 Mbps 表示综合能源业务数据流量。在仿真实验中, 云数据中心的运行寿命设置为 15 年。

3.2 结果及分析

针对本节设定的电力系统案例, 采用 2.4 节中的方法在 CPU 为 Intel Core i5-4460、主频 3.6 GHz、内存为 8 G 的计算机利用 Matlab 2016b 进行求解, 在 0.3 s 左右得到结果。云数据中心优化选址方案如图 4 所示, 图中的综合能源节点和变电站编号分别与表 1 和表 2 中的编号相对应。在最优选址方案中, 数据中心建设在 4 号和 5 号变电站。从数据中心选址来看, 低节点电价变电站是建设数据中心的优选位置, 以降低运行成本; 从通信网络来看, 综合能源节点和变电站倾向于与最近的数据中心相连, 以降低建设成本。该方案实现了对成本的优化, 并且与本文所提出的云计算架构的原则相符, 证明了本文优化选址策略的有效性。

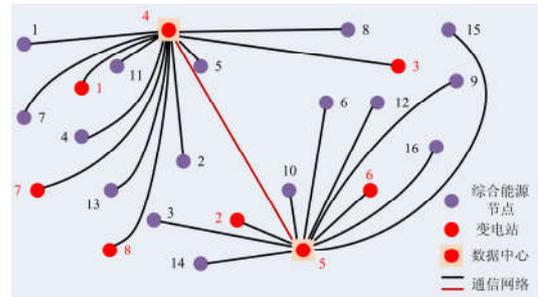


图 4 云数据中心优化选址方案

Fig. 4 Optimum cloud data center layout

为了分析数据中心数量和变电站电力资源对云数据中心优化选址的影响, 设置了不考虑变电站电力资源的仿真条件, 该条件下变电站都以 0.8 ¥/kW·h 的市场电价对数据中心供电, 变电站电力资源无差异。根据图 5 和图 6, 不考虑变电站电力资源条件下的运行成本恒定, 优化选址无法实现运行成本的优化, 但是可以实现建设成本单一目标的最优。

综合图 5—图 7, 数据中心数量与建设成本成正比, 应当在满足运行成本优化的前提下尽量减少数据中心数量, 此案例中两个数据中心是最优选择。变电站电力资源能够显著降低运行成本, 对数据中心总成本的优化具有重要意义, 证明了变电站资源

用于建设数据中心的有效性和经济性。

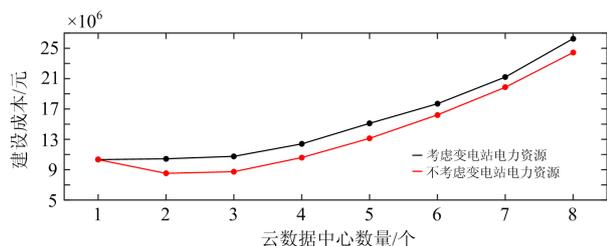


图 5 建设成本对比

Fig. 5 Comparison of construction cost

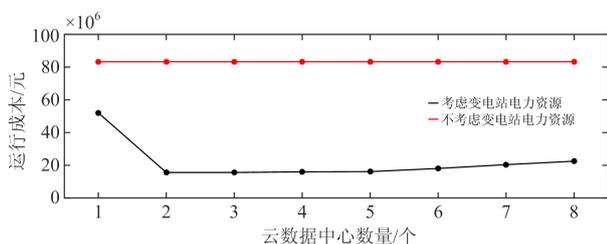


图 6 运行成本对比

Fig. 6 Comparison of operating cost

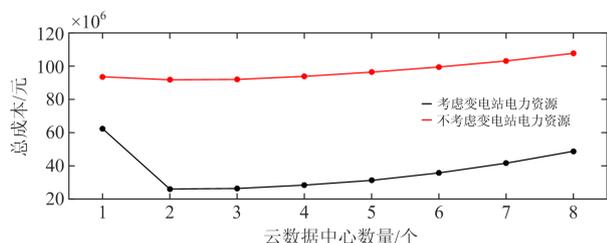


图 7 总成本对比

Fig. 7 Comparison of total cost

4 结论

本文面向泛在电力物联网背景下的电力系统, 提出基于变电站的分布式云计算架构和基于成本最优的云数据中心优化选址策略。案例仿真证明该优化选址策略能够适应本文提出的云计算架构, 实现对总成本的优化, 策略的有效性得到证明。本文的优化问题可以快速求解, 说明所提出的优化策略可以运用于结构更加复杂、综合能源业务更加多样的电力系统。本文的云数据中心优化选址问题模型还存在提升空间, 需要考虑负荷调度策略和综合能源业务服务质量要求等因素对模型进行完善。此外, 本文设定的案例参数和实际情况相比会存在一定出入, 需要结合实际案例对综合能源业务和数据中心建设运行成本进行更细致的考虑以增强严谨性。

参考文献

[1] 陈皓勇, 陈永波, 王晓娟, 等. 基于 LPWAN 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 1-8.

- CHEN Haoyong, CHEN Yongbo, WANG Xiaojuan, et al. Ubiquitous power internet of things based on LPWAN[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 1-8.
- [2] 王毅, 陈启鑫, 张宁, 等. 5 G 通信与泛在电力物联网的融合: 应用分析与研究展望[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1575-1585.
- WANG Yi, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Fusion of the 5 G communication and the ubiquitous electric internet of things: application analysis and research prospects[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1575-1585.
- [3] 杨挺, 翟峰, 赵英杰, 等. 泛在电力物联网释义与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13): 9-20.
- YANG Ting, ZHAI Feng, ZHAO Yingjie, et al. Explanation and prospect of ubiquitous electric power internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 9-20.
- [4] 沐连顺, 崔立忠, 安宁. 电力系统云计算中心的研究与实践[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 171-175.
- MU Lianshun, CUI Lizhong, AN Ning. Research and practice of cloud computing center for power system[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 171-175.
- [5] 李静, 罗雅迪, 郭健, 等. 调控云环境下在线计算软件服务研究与应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 159-164.
- LI Jing, LUO Yadi, GUO Jian, et al. On-line calculation software service and its application analysis under dispatching cloud[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 159-164.
- [6] LUO X, ZHANG S, LITVINOV E. Practical design and implementation of cloud computing for power system planning studies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2301-2311.
- [7] MA F, LUO X, LITVINOV E. Cloud computing for power system simulations at ISO New England — experiences and challenges[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2596-2603.
- [8] GUAN Z, LI J, WU L, et al. Achieving efficient and secure data acquisition for cloud-supported internet of things in smart grid[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(6): 1934-1944.
- [9] 李丹, 陈贵海, 任丰原, 等. 数据中心网络的研究进展与趋势[J]. 计算机学报, 2014, 37(2): 259-274.
- LI Dan, CHEN Guihai, REN Fengyuan, et al. Data center network research progress and trends[J]. Chinese Journal of Computers, 2014, 37(2): 259-274.
- [10] LIU R, SUN W, HU W. Planning of geo-distributed cloud data centers in fast developing economies[C] // 20th International Conference on Transparent Optical Networks,

2018, Bucharest, Rumania: 1-4.

[11] 张越, 王伯伊, 李冉, 等. 多站融合的商业模式与发展路径研究[J]. 供用电, 2019, 36(6): 62-66.
ZHANG Yue, WANG Boyi, LI Ran, et al. Research on business mode and development path of multi-station integration[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(6): 62-66.

[12] 张晓丽, 杨家海, 孙晓晴, 等. 分布式云的研究进展综述[J]. 软件学报, 2018, 29(7): 2116-2132.
ZHANG Xiaoli, YANG Jiahai, SUN Xiaoqing, et al. Survey of geo-distributed cloud research progress[J]. Journal of Software, 2019, 29(7): 2116-2132.

[13] SHARMA P K, CHEN M, PARK J K. A software defined fog node based distributed blockchain cloud architecture for IoT[J]. IEEE Access, 2018, 6: 115-124.

[14] SALLAHI A, HILAI M. Optimal model for the controller placement problem in software defined networks[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(1): 30-33.

[15] BERRAL J, GOIRI I, NGUYEN T, et al. Building green cloud services at low cost[C] // IEEE 34th International Conference on Distributed Computing Systems, 2014, Madrid, Spain: 449-460.

[16] WU Y, TORNATORE M, FERDOUSI S, et al. Green data center placement in optical cloud networks[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2017, 1(3): 347-357.

[17] 林威, 靳小龙, 穆云飞, 等. 区域综合能源系统多目标最优混合潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5829-5839.
LIN Wei, JIN Xiaolong, MU Yunfei, et al. Multi-objective optimal hybrid power flow algorithm for integrated local area energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5829-5839.

[18] 加鹤萍, 丁一, 宋永华, 等. 信息物理深度融合背景下综合能源系统可靠性分析评述[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 1-11.
JIA Heping, DING Yi, SONG Yonghua, et al. Review of reliability analysis for integrated energy systems with integration of cyber physical systems[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 1-11.

[19] MONESS M, MOUSTAFA A M. A survey of cyber-physical advances and challenges of wind energy conversion systems: prospects for internet of energy[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(2): 134-145.

[20] 刘俊红, 邓兆云, 李泽科, 等. 基于即插即用的智能变电站信息自动校核技术[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 137-143.
LIU Junhong, DENG Zhaoyun, LI Lianke, et al. Automatic information verification technology of smart substation based plug and play[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 137-143.

[21] HOGADE N, PASRICHA S, SIEGEL H, et al. Minimizing energy costs for geographically distributed heterogeneous data centers[J]. IEEE Transactions on Sustainable Computing, 2018, 3(4): 318-331.

[22] DOU H, QI Y, WEI W, et al. Carbon-aware electricity cost minimization for sustainable data centers[J]. IEEE Transactions on Sustainable Computing, 2017, 2(2): 211-223.

[23] CHEN S, IRVING S, PENG L. Operational cost optimization for cloud computing data centers using renewable energy[J]. IEEE Systems Journal, 2016, 10(4): 1447-1458.

[24] BADAL F R, DAS P, SARKER S, et al. A survey on control issues in renewable energy integration and microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 87-113. 2019, 4(4): 87-113. DOI: 10.1186/s41601-019-0122-8.

[25] BONACQUISTO P, MODICA G D, PETRALIA G, et al. A procurement auction market to trade residual cloud computing capacity[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2015, 3(3): 345-357.

[26] 陈桥平, 陈志光, 黄勇, 等. 智能变电站过程层网络报文与流量分布计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 117-121.
CHEN Qiaoping, CHEN Zhiguang, HUANG Yong, et al. Calculation of distribution of message and traffic load for process bus network in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 117-121.

收稿日期: 2019-09-24; 修回日期: 2019-12-03

作者简介:

张子仪(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析运行与控制等; E-mail: 771435987@qq.com

蔡泽祥(1960—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析、稳定和控制等。E-mail: epzxcai@scut.edu.cn

(编辑 许威)