

“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

卢子敬¹, 邓艺欣², 蒋霖¹, 李金雨², 刘子嫣², 梁海峰^{2*}, 张铁峰²

(1. 国网湖北省电力有限公司, 湖北省 武汉市 430077;

2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北省 保定市 071003)

Research on the Influence of Large-scale Data Center Construction on Power Grid Planning Under the Background of East Digital West Computing

LU Zijing¹, DENG Yixin², JIANG Lin¹, LI Jinyu², LIU Ziyan², LIANG Haifeng^{2*}, ZHANG Tiefeng²

(1. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, Hubei Province, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

Abstract: With the continuous development of new digital infrastructure, the power density of a single cabinet in a data center is increasing, resulting in high power consumption and high electricity cost. Orderly transfer of data centers to the west, where clean energy is abundant, can not only promote green development of data centers, but also reduce power transmission over long distances on the lines. In this context, the paper studies the influence of data center on power grid planning. Firstly, considering the load of data center, the energy consumption model of data center is established, and according to the probability density function of wind farm and photovoltaic power station output, a two-layer model of power grid planning is built considering data center. The upper layer takes the construction of each line as the optimization object and the minimum annual investment cost of the line as the objective function to obtain the grid planning scheme. The lower layer optimizes the configuration of the energy storage system according to the grid structure and considering the energy consumption characteristics of the data center, and returns the charge and discharge power of the energy storage system to the upper layer for the next optimization as part of the system power flow constraint. An improved particle swarm optimization algorithm and YALMIP are used to solve the problem. Finally, an improved 18-node system is used to verify the feasibility and

effectiveness of the proposed model and method.

Keywords: data center; clean energy; power grid planning; punishment for unused wind and solar power; two-tier model

摘要: 随着数字新基建的不断发展, 数据中心单机柜功率密度不断增加, 数据中心耗电量大、用电成本高的问题也越来越突出。将数据中心有序向清洁能源丰富的西部转移, 不仅可促进数据中心绿色发展, 就地消纳风、光等绿色能源, 而且可减少线路上远距离传输的功率。在此背景下, 研究数据中心对电网规划的影响非常有意义。首先, 考虑数据中心负荷情况, 建立了数据中心的能耗模型, 并根据风电场与光伏电站出力的概率密度函数, 构建考虑数据中心在内的电网规划双层模型。上层以每条线路是否建设为优化对象, 以线路投资费用最小为目标函数, 得到电网规划方案。下层按照网架结构并考虑数据中心用能特性, 以储能系统的投资成本、风光未利用惩罚成本之和最小为目标函数对储能系统进行优化配置, 将储能系统容量返回上层作为系统潮流约束的一部分进行下一次优化。采用改进型粒子群算法和YALMIP联合求解。最后, 用改进的18节点算例系统验证了所提模型与方法的可行性和有效性。

关键词: 数据中心; 清洁能源; 电网规划; 风光未利用惩罚; 双层模型

0 引言

随着《全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案》的推进, “东数西算”进入了公众视野。“东数西算”是通过构建数据中心、云计算、大

基金项目: 全球能源互联网集团有限公司科技项目“面向信息通信新技术发展的电网规划关键问题研究”(SGGEIG00JYJS2100037)。

Science and Technology Foundation of Global Energy Interconnection Group Co., Ltd. (SGGEIG00JYJS2100037).

数据一体化的新型算例网络体系^[1], 将东部算例需求有序引导到西部地区来计算和处理, 既缓解东西部资源错配的问题, 也给西部开辟一条发展新路^[2]。近年来, 由于数字技术向经济社会各领域全面持续渗透, 数据中心作为数字“新基建”的核心设施^[3], 其规模与能耗水平在不断增大。据统计, 截至2019年底, 中国数据中心总量达7.4万个, 数据中心用电量约为1600亿kWh, 2021年国内数据中心机架规模达543.5万架, 同比增长27%, 预计到2025年国内数据中心机架规模较2021年增长40%, 能源消耗总量较2021年增加62%, 约占全社会用电量的4%^[4]。由此可见, 数据中心已成为电网重要负载和能耗大户^[5], 数据中心需要消耗大量电能, 对节能减排带来极大挑战。此外, 中国数据中心的分布表现为东多西少, 据开放数据中心委员会 (Open Data Center Committee, ODCC) 数据显示, 2019年, 北京、上海、广州三地及其周边的数据中心机架分别占全国规模的27%、25%、13%, 三者合计已占全国规模的65%^[6]。高能耗数据中心大规模建设增加了东部地区能源供给的压力与电网网架建设的费用^[7]。因此, 通过合理布局数据中心, 将数据中心建在气候适宜、绿色能源充沛的西部地区对降低数据中心用能成本、缓解东部地区能源短缺问题具有重要意义。

针对数据中心高用电成本的问题, 目前国内外开展了不少研究。文献[8]考虑基于数据中心的光-储协同优化配置, 通过分析数据中心用电需求特征和电网电价机制, 降低数据中心运行成本。文献[9]以价格敏感和降温效率为目标对数据中心批处理负荷进行调度, 从而最大限度地降低数据中心的用能成本。文献[10]考虑数据中心负荷特性对电网的影响, 构建电网与数据中心之间相互作用的两阶段模型。文献[11]提出了一种用于数据中心实时能量管理的能耗优化模型, 通过探索数据中心负荷与动态电价之间的协同作用, 节约能耗成本。除了在数据中心运行时对其进行优化调度, 有些研究将数据中心与电源侧结合进行联合管理。文献[12]构建风光水互补发电系统与数据中心的联合优化调度模型, 利用需求侧的数据中心参与电源侧需求响应来提高系统的经济性。文献[13]提出了一种考虑风能和数据负载分配的数据中心优化调度模型, 利用负载分配策略, 提高风光利用率, 降低数据中心运行成本。

总结来看, 现有对降低数据中心用能成本方面的研究主要集中在数据中心运行时对其进行优化调度上, 但鲜有文献将数据中心考虑到电网规划中。随着

清洁能源在电网中的渗透率不断提高^[14], 大规模风电和光伏接入电网后, 受到原有电网送出能力的限制, 出现了输电阻塞和风光资源部分未利用的现象^[15-17]。目前研究利用高能耗数据中心消纳清洁能源以减少风光资源未利用的损失、降低数据中心用能成本及减少线路远距离传输功率等方面的文献还较少。同时, 随着中国“东数西算”的推进, 将数据中心迁移至西部地区使其充分使用西部地区的清洁能源, 有利于数据中心绿色发展。因此, 研究“东数西算”下数据中心对电网规划的影响是非常有意义的。

综上, 本文从数据中心参与电网规划的角度出发, 研究“东数西算”背景下数据中心对电网规划的影响, 构建考虑数据中心在内的电网规划双层模型。该上层模型以线路投资费用最小为目标函数, 得到电网规划方案。下层模型按照该网架结构以风光未利用惩罚成本与储能投资成本之和最小为目标函数, 重点研究考虑数据中心在内的储能系统优化配置问题, 通过配置储能系统一方面平抑风电、光伏输出功率的波动, 另一方面在风光出力大时, 储能系统储存电量, 且在风光出力小时释放电量, 并考虑数据中心用能特性使其最大化消纳清洁能源。最后, 采用改进型粒子群算法和YALMIP联合求解, 通过算例分析验证了模型的有效性, 为数据中心参与电网规划提供了策略参考。

1 数据中心能耗分析

1.1 数据中心能耗构成

如图1所示, 数据中心的能量消耗来源分为3部分^[18]: IT设施能耗、基础设施能耗和其他设施能耗。IT设施指的是服务器系统, 包括数据中心的计算、存储、网络等不同类型的设备; 配套基础设施主要包括冷却系统和供配电系统, 冷却系统保证了IT设备运行所需的温度及湿度环境, 供配电系统提供了满足IT设备使用的电压和电流; 其他设施包括照明设备、安防设备、传感器及相关数据中心建筑的管理系统等。

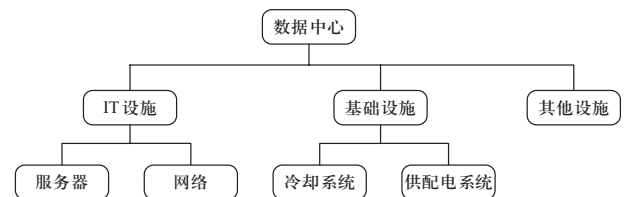


图1 数据中心能耗构成

Fig. 1 Data center power consumption

1.2 数据中心能耗模型

根据数据中心的能耗构成,以分块建模的思路采用加性模型^[19]表示数据中心的总能耗,如式(1)所示。

$$P_{DC} = P_{IT} + P_{base} + P_{other} \quad (1)$$

式中: P_{DC} 为数据中心总能耗; P_{IT} 为IT设备能耗; P_{base} 为基础设施能耗; P_{other} 为其他设施能耗。

数据中心IT设备能耗与数据负载处理有关,数据中心数据负载分为延迟容忍型和延迟敏感型两类,延迟容忍型数据负载对实时响应要求高,延迟敏感型数据负载对实时响应要求低,在一定时限内完成即可。本文假定延迟容忍型数据负载的处理在2 h之内完成^[20],依据数据中心延迟容忍型数据负载转移特性可得数据中心IT设备能耗,如式(2)所示。

$$P_{IT} = \sum_{t=1}^T (P_{scn,t} + P_{tole,ori,t} - P_{tole,tro,t} + P_{tole,trs,t}) \quad (2)$$

式中: $P_{scn,t}$ 为 t 时刻处理延迟敏感型数据负载功率; $P_{tole,ori,t}$ 为 t 时刻未经过调节的可延迟容忍型数据负载用电功率; $P_{tole,tro,t}$ 为 t 时刻移出的可延迟容忍型数据负载用电功率; $P_{tole,trs,t}$ 为 t 时刻移入的可延迟容忍型数据负载用电功率。

考虑到数据中心数据负载处理受服务器的限制,数据中心IT设备功率约束为

$$0 \leq P_{IT,t} \leq P_{IT,max} \quad (3)$$

式中: $P_{IT,max}$ 为数据中心数据负载处理功率最大值。

基础设施及其他设施能耗可通过电源使用效率进行计算^[21],IT设备能耗与基础设施、其他设施能耗之间的关系可用式(4)来表示。

$$P_{base} + P_{other} = (\zeta_{PUE} - 1)P_{IT} \quad (4)$$

式中: ζ_{PUE} 为电能利用效率,定义为数据中心总能耗与IT设备能耗之比,此处取值为1.5。

2 考虑数据中心在内的电网规划双层模型

2.1 考虑数据中心在内的电网结构

考虑数据中心在内的电网结构示意图如图2所示。风电场、光伏电站、储能系统通过变换器与系统交流母线相连,数据中心、地方负荷也等值连接到系统交流母线上。

2.2 风光出力模型

2.2.1 光伏电站出力模型

光照强度的概率分布特性符合Beta分布^[22],概率密度函数表达式为

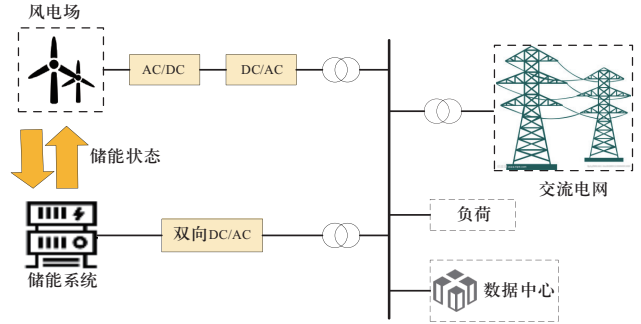


图2 考虑数据中心在内的电网结构示意图

Fig. 2 Diagram of power grid structure with data center

$$f(k) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{k_t}{k_r}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{k_t}{k_r}\right)^{\beta-1} \quad (5)$$

式中: α 和 β 分别为Beta分布的形状参数和尺寸参数; k_t 为实际光照辐射强度; k_r 为额定光照辐射强度,可由历史数据获得。

光伏电站的实际输出功率由光照辐射强度与额定有功功率组成,模型表达式为

$$P_{PV}(t) = \begin{cases} P_{PV,r} \frac{k_t}{k_r}, & k_t \leq k_r \\ P_{PV,r}, & k_t > k_r \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{PV}(t)$ 为光伏电站实际输出功率; $P_{PV,r}$ 为光伏电站的额定有功功率。

2.2.2 风电场出力模型

利用Weibull分布描述风速 v 的随机行为^[23]。

$$c = \frac{\mu}{\Gamma\left(\frac{1+h}{h}\right)} \quad (7)$$

$$h = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^{-1.068} \quad (8)$$

$$f(v) = \frac{h}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{h-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^h} \quad (9)$$

式中: h 、 c 分别为Weibull分布的形状参数、尺度参数; 形状参数 h 由Weibull分布的标准差 σ 与数学期望 μ 确定。

风电场的输出功率与风速有关,结合风速模型,可以将风电场出力的数学模型表示为

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0, & v(t) < v_{ci}, v(t) > v_{co} \\ P_r \frac{v(t) - v_{ci}}{v_r - v_{ci}}, & v_{ci} < v(t) < v_r \\ P_r, & v_r < v(t) < v_{co} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{WT}(t)$ 为风电场实际输出功率; P_r 为风电场输出的最大功率; $v(t)$ 为当前时段的风速; v_r 、 v_{ci} 、 v_{co} 分别为风电场额定风速、切入风速和切出风速。

2.3 电网规划双层模型

2.3.1 双层规划方案

建立考虑数据中心在内的电网规划双层模型。上层模型首先求出电网网架, 并将其传递给下层, 下层模型据此对储能系统的容量进行优化配置, 并将求解结果反馈到上层, 如此循环迭代得到最终的电网规划方案和储能系统的容量。电网规划流程如图3所示。

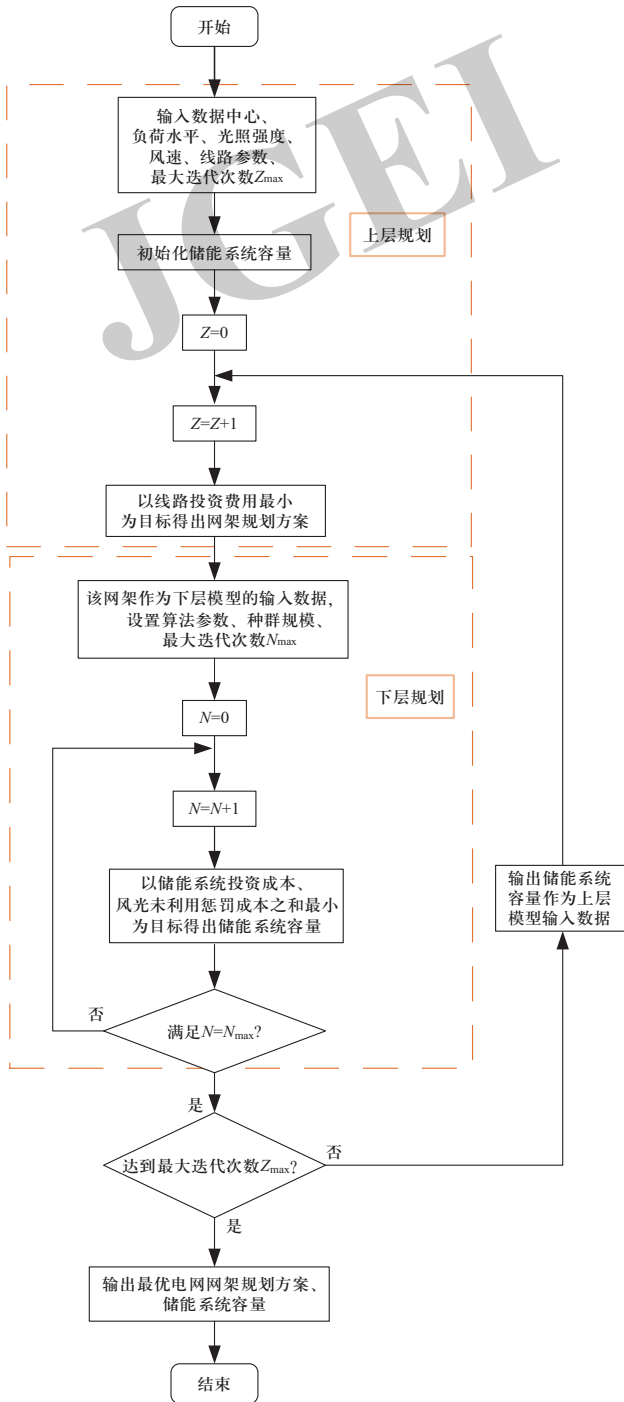


图3 电网规划流程图

Fig. 3 Power grid planning flow chart

2.3.2 电网规划上层模型

上层模型从电网经济性的角度出发, 优化电网网架结构。以线路投资费用最小为目标函数, 目标函数为

$$\min F_1 = \sum_{\substack{i,j \in n \\ i \neq j}} x_{ij} c_{ij} \quad (11)$$

式中: x_{ij} 表示节点 i 、 j 间是否有线路被建设, 0 表示不被建设, 1 表示被建设; c_{ij} 为节点 i 与节点 j 间线路的建设成本。

1) 系统潮流约束。

$$B\theta = P_g + P_{ESS} + P_{WT} + P_{PV} - P_L - P_{DC} \quad (12)$$

式中: B 为节点导纳矩阵; θ 为节点电压相角向量; P_g 为常规发电机输出功率向量; P_{ESS} 为下层模型返回的储能系统输出功率向量; P_{WT} 为风电场输出功率向量; P_{PV} 为光伏电站输出功率向量; P_L 为负荷功率向量; P_{DC} 为数据中心功率向量。

2) 待建线路潮流约束。

$$\begin{cases} P_{ij} = \sum_{\substack{i,j \in n \\ i \neq j}} x_{ij} B_{ij} (\theta_i - \theta_j) \\ -\frac{\pi}{2} \leq \theta_i - \theta_j \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (13)$$

式中: B_{ij} 为线路 i - j 的电纳; i 为线路 i - j 的首端节点; j 为线路 i - j 的末端节点; θ_i 为线路 i - j 的首端节点 i 的相角; θ_j 为线路 i - j 的末端节点 j 的相角。

3) 线路传输容量约束。

$$P_{ij} \leq P_{ij,max} \quad (14)$$

式中: P_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间线路传输的功率; $P_{ij,max}$ 为节点 i 和节点 j 之间线路的最大传输容量。

4) 发电机运行约束。

$$P_{g,min} \leq P_g \leq P_{g,max} \quad (15)$$

式中: $P_{g,min}$ 、 $P_{g,max}$ 分别为发电机输出功率的最小值、最大值。

2.3.3 电网规划下层模型

下层模型从消纳清洁能源的角度出发, 考虑数据中心负荷, 并根据上层所得的电网网架对储能系统的容量进行优化配置。以储能系统的投资成本、风光未利用惩罚成本之和最小为目标函数。

目标函数为

$$\min F_2 = \lambda_1 e_{ch} + \lambda_2 e_{qi} \quad (16)$$

式中: λ_1 、 λ_2 为权重系数; e_{ch} 为储能系统的投资成本; e_{qi} 为风光未利用惩罚成本。

1) 储能系统的投资成本。

$$e_{ch} = \sum_{m=1}^{N_{ESS}} \frac{a(1+a)^{R_1}}{(1+a)^{R_1} - 1} C_{ESS,m} E_{ESS,m} \quad (17)$$

式中: N_{ESS} 为储能系统的总数; $C_{\text{ESS},m}$ 为储能系统 m 的单元投资成本; $E_{\text{ESS},m}$ 为储能系统 m 所配置的单元数量; a 为贴现率; R_1 为储能系统的使用年限。

2) 风光未利用惩罚成本。

风光电能送出能力受到送出线路传输容量及本地消纳能力的限制。如果某一时刻风光的出力大于线路传输容量及本地消纳能力的限制, 则会造成线路过载; 反之, 风光电能可以最大化被本地负荷消纳且能正常输送到电网中。根据风光送出线路传输容量及本地消纳能力不足的限制条件, 可得风光未利用损失计算方法, 风光未利用惩罚成本为

$$e_{\text{qi}} = k_{\text{wp}} \sum_{t=1}^{24} \left[\frac{P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{ESS}}(t)}{P_{\text{R}} - P_{\text{DC}}(t) - P_{\text{L}}(t)} \right] \quad (18)$$

式中: k_{wp} 为风光未利用惩罚系数, 此处取 0.65 元/kWh; P_{R} 为输电线路传输容量限值; $P_{\text{WT}}(t)$ 为 t 时刻风电场出力; $P_{\text{DC}}(t)$ 为 t 时刻数据中心功率; $P_{\text{PV}}(t)$ 为 t 时刻光伏电站出力; $P_{\text{ESS}}(t)$ 为 t 时刻储能系统充/放电功率, 且储能系统在同一时刻只能表示一种状态。

约束条件如下。

1) 系统功率平衡约束。

$$P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{g}}(t) + P_{\text{ESS}}(t) = P_{\text{DC}}(t) + P_{\text{L}}(t) \quad \forall t \in T \quad (19)$$

式中: $P_{\text{g}}(t)$ 为 t 时刻火电机组的有功出力; $P_{\text{L}}(t)$ 为 t 时刻的系统总负荷。

2) 储能系统的充放电功率、容量约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ESS}}(t) \leq P_{\text{rate}}^{\text{ESS}} \\ S_{\text{OCmin}} E^{\text{ESS}} \leq E^{\text{ESS}} \leq S_{\text{OCmax}} E^{\text{ESS}} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $P_{\text{rate}}^{\text{ESS}}$ 为储能系统的充放电额定功率; S_{OCmin} 和 S_{OCmax} 分别为储能系统的最小荷电状态和最大荷电状态; E^{ESS} 为储能系统的规划容量。

3) 储能系统的充放电状态约束。

$$\forall S_i \in \{0, 1\} \quad (21)$$

式中: 使用整数集表示储能系统充、放电的两种状态, 0 表示储能系统充电, 1 表示储能系统放电。

4) 风光出力约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{PV}} \leq P_{\text{PV,max}} \\ P_{\text{WT,min}} \leq P_{\text{WT}} \leq P_{\text{WT,max}} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_{\text{PV,max}}$ 为光伏电站出力的最大值; $P_{\text{WT,min}}$ 、 $P_{\text{WT,max}}$ 分别为风电场出力的最小值和最大值。

3 算法求解

考虑数据中心在内的电网规划双层模型以代表日

进行运行。上层网架规划模型为混合整数非线性模型, 决策变量为线路是否被建设且属于 0-1 变量, 采用分支定界法并基于 MATLAB+YALMIP 中的 mosek 商业求解器进行求解。下层储能系统容量规划模型为多目标规划模型, 利用改进型粒子群算法进行求解。两种算法均在配置 CPU 为锐龙 R7-5800H, 内存为 16GB 的 Lenovo Pro14 微机上实现, 算法运行时间为 15 s。

分支定界法的模型为

$$\begin{aligned} \min \quad & F_1(x) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} h(x) = 0 \\ g(x) \leq 0 \\ x \in \{0, 1\} \end{cases} \end{aligned} \quad (23)$$

利用分支定界法求解上层网架规划模型的关键是将表示线路建设与否的二进制变量连续化^[24], 形成松弛问题, 即:

$$\begin{aligned} \min \quad & F_1(x) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} h(x) = 0 \\ g(x) \leq 0 \\ 0 \leq x \leq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (24)$$

基于松弛问题, 将网架规划方案的投资费用最小问题作为分支, 以投资费用最小值为定界, 对无法得到最优解的情况进行剪枝, 不断迭代, 得到最优网架规划方案。

下层储能系统容量规划模型为多目标规划模型, 利用改进型粒子群算法进行求解。改进型粒子群算法通过动态调整惯性权重来更新粒子速度与位置, 有效提高了粒子群算法的收敛精度和全局收敛能力, 粒子位置、速度用向量表示为

$$\mathbf{X}_u = (x_{u,1}, x_{u,2}, \dots, x_{u,D}) \quad (25)$$

$$\mathbf{V}_u = (v_{u,1}, v_{u,2}, \dots, v_{u,D}) \quad (26)$$

式中: \mathbf{X}_u 、 \mathbf{V}_u 分别为粒子 u 的位置、速度向量; D 为状态标量的维数; 对于每一代, 粒子位置和速度采用概率方法^[25]来确定, 如式 (27)~式 (29) 所示。

$$v_{u,d}(t+1) = \omega v_{u,d}(t) + c_1 r_1 [p_{\text{Best},u,d}(t) - x_{u,d}(t)] + c_2 r_2 [g_{\text{Best},d}(t) - x_{u,d}(t)] \quad (27)$$

$$x_{u,d}(t+1) = x_{u,d}(t) + v_{u,d}(t+1) \quad (28)$$

$$\omega = (\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}})t / N_{\text{max}} + \omega_{\text{min}} \quad (29)$$

式中: $d \in [1, D]$; $v_{u,d}(t)$ 、 $x_{u,d}(t)$ 分别为第 d 维下第 t 次迭代时粒子 u 的速度和位置; p_{Best} 、 g_{Best} 分别为每个粒子经过的最好位置、群体中所有粒子经过的最好位置; ω 为惯性权重系数; r_1 、 r_2 为区间 [0, 1] 之间的随机数; c_1 、 c_2 分别为调节全局、个体最优粒子的步长; N_{max} 为最大迭代次数。

4 算例分析

4.1 算例介绍

采用改进的18节点系统^[26]进行算例分析, 网络拓扑结构如图4所示。将18节点系统分为西部地区A和东部地区B。18节点系统包含6个发电厂, 分别建在节点3、5、7、13、16和18上, 16条实线表示已建线路, 15条虚线表示待建线路。在节点16、18分别接入800 MW光伏电站、1000 MW风电场。数据中心接入18节点系统的网架结构图如图5所示。改进的18节点系统的负荷、发电机、线路参数见附录A表A1、A2、A3、A4。算例参数设置如表1所示。

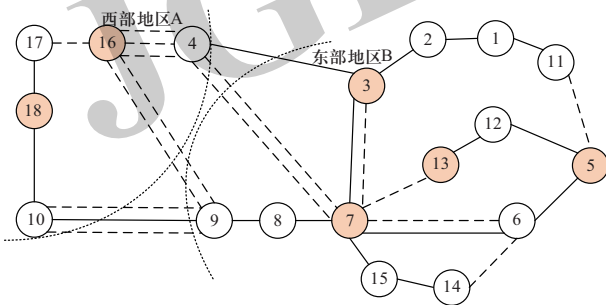


图4 18节点系统网架结构图

Fig. 4 Structure diagram of 18-node system

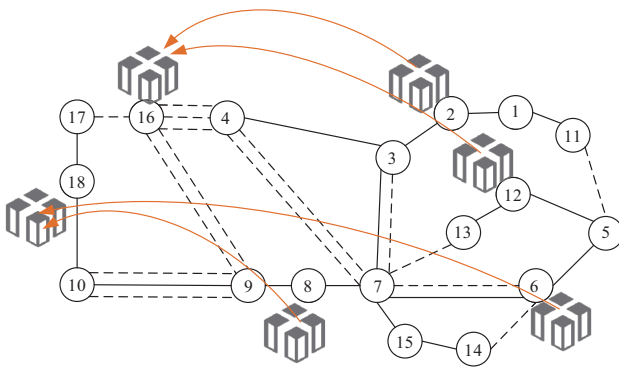


图5 数据中心接入18节点系统的网架结构图

Fig. 5 The network structure diagram of the data center connecting to an 18-node system

表1 参数设置

Table 1 Parameters setting

算例参数	参数数值
储能系统投资成本/(元·kW ⁻¹)	2000
新建线路投资费用/(万元·km ⁻¹)	150
系统电压/kV	500
系统总负荷/MW	35 720

选取某个东部地区的大型数据中心作为研究对象, 考虑数据中心用能特性, 在处理数据中心延迟容忍型数据负载规定时限内, 将数据中心延迟容忍型数据负载尽可能转移至清洁能源出力增加的时段, 进一步促进清洁能源消纳。一天内数据中心数据负载转移前后负荷功率变化如图6所示。

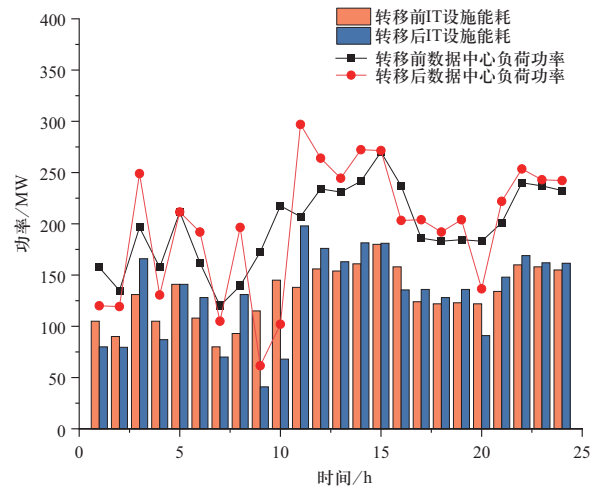


图6 数据中心数据负载转移前后负荷功率变化图

Fig. 6 Data center load power change before and after data load transfer

4.2 电网网架规划结果分析

为了分析“东数西算”背景下数据中心对电网规划的影响, 设置了2种规划方案, 通过对比2种方案下的电网规划及储能优化配置结果来验证所提的规划模型的有效性。

方案1: 数据中心建在东部地区B的节点2、节点12、节点8和节点6上。

方案2: 将数据中心迁移至西部地区, 即将位于东部地区B的节点2和节点12的数据中心移入西部地区A的节点16上, 将位于东部地区B的节点6和节点8的数据中心移入西部地区A的节点18上。

2种规划方案电网网架成本对比如表2所示。

表2 不同规划方案下的电网网架成本

Table 2 Grid rack cost under different planning schemes

对比项目	方案1	方案2
新建线路	4-16(3), 4-7(1), 9-16(1), 3-7(1), 6-7(1), 7-13(1), 16-17(1)	4-16(2), 9-16(1), 6-7(1), 7-13(1), 16-17(1)
线路建设成本/万元	287 475	152 625

(注: 括号内表示线路回路数。)

由表2可知,与方案1相比,方案2节约了47%的线路投资成本。图7中实线为两方案共建的线路,虚线为方案1比方案2多建设的3条线路,并且这3条线路都是风光的送出通道。由此可见,“东数西算”背景下,将数据中心考虑到电网规划中不仅可以促进西部地区清洁能源的消纳,而且可以节省网架规划中线路投资的费用,并提升了输电线路的利用率。

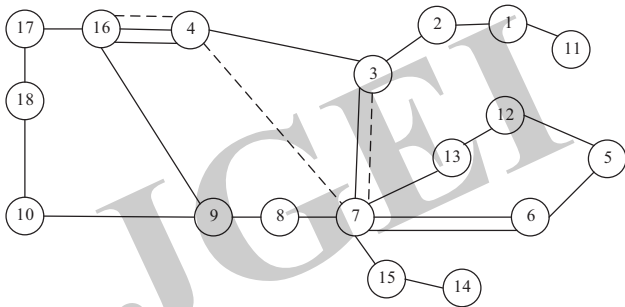


图7 不同方案下电网规划结果对比

Fig. 7 Comparison of power grid planning results under different planning schemes

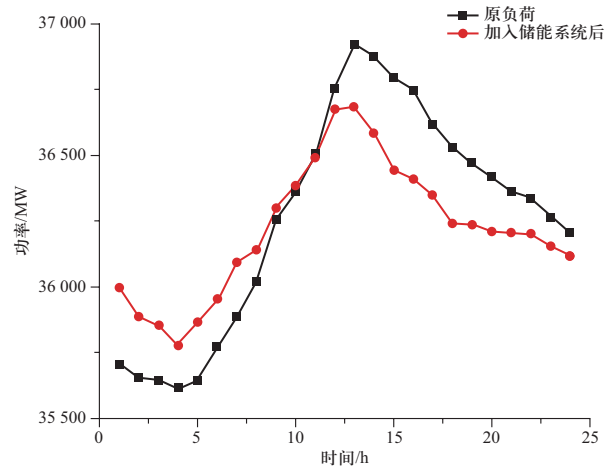
4.3 储能系统优化配置结果分析

考虑清洁能源发电具有间歇性和波动性,利用储能系统的充放电来缓解清洁能源出力间歇性的问题。不同方案下含储能系统前后的系统总负荷对比如图8所示。

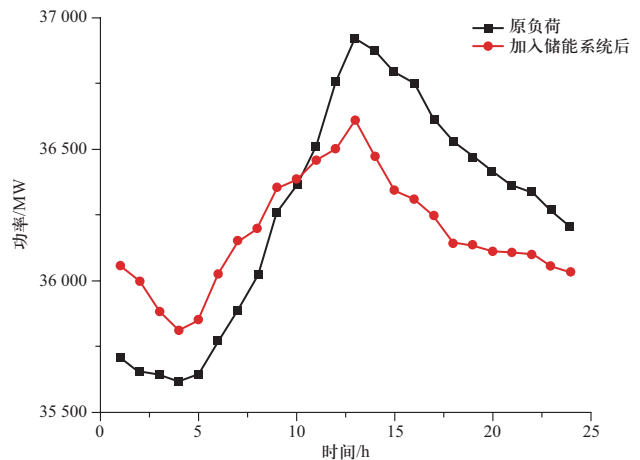
图8(a)是未考虑将数据中心迁入西部地区的电网规划方案,图8(b)是考虑将数据中心迁入西部地区的电网规划方案,可以看出,加入储能系统后对负荷具有明显的削峰填谷作用,会降低系统总负荷的峰谷差,且方案2对负荷削峰填谷的效果优于方案1。

不同方案下的储能系统运行图如图9、图10所示。储能优化配置结果如表3所示。

从图9、图10可以看出,储能系统在01:00—06:00这段时间,光伏电站无出力,储能系统放电;在11:00—15:00这段时间,光伏电站出力增加,储能系统充电。风电场在11:00—14:00这段时间出力较少,储能系统放电;在21:00—24:00这段时间,风电场出力增加,储能系统充电。同时,数据中心延迟容忍型数据负载在规定处理时限内,转移至风电场、光伏电站出力增加时段处理。由此可以推出,储能系统在风电场、光伏电站出力大,且负荷消纳风光不足时吸收功率并储存,在无光伏电站出力、风电场出力小时释放能量,以此来平抑系统净负荷曲线。



(a) 方案1含储能系统前后的系统总负荷对比图



(b) 方案2含储能系统前后的系统总负荷对比图

图8 不同方案下含储能系统前后的系统总负荷对比图
Fig. 8 Comparison diagram of total system load before and after including energy storage system under different schemes

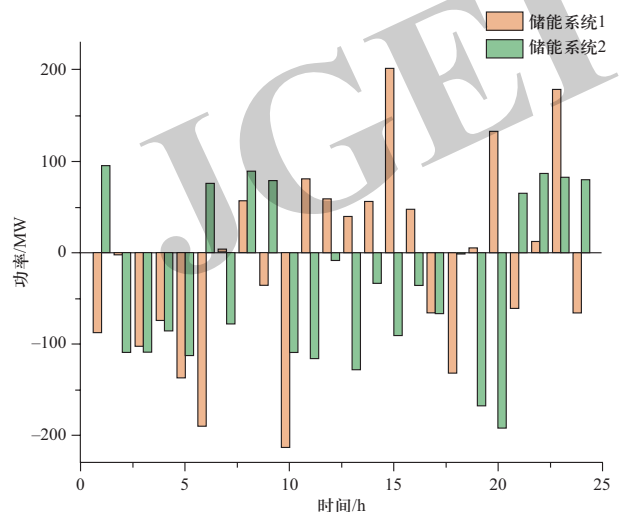


图9 方案1的储能系统运行图

Fig. 9 Operation diagram of energy storage system of scheme 1

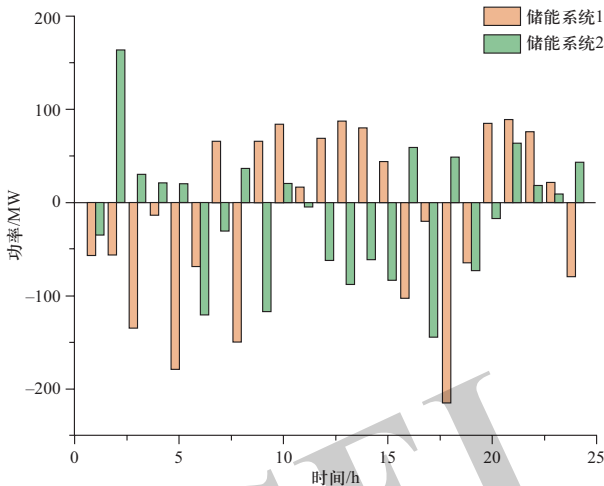


图 10 方案2的储能系统运行图

Fig. 10 Operation diagram of energy storage system of scheme 2

表 3 不同方案下储能系统优化配置结果

Table 3 Results of optimal configuration of energy storage system under different schemes

储能系统位置	节点16	节点18
方案1下的储能系统容量/MW	618	878
方案2下的储能系统容量/MW	691	747

不同规划方案成本对比如表4所示。

表 4 不同规划方案成本对比

Table 4 Cost comparison of different planning schemes

对比项目	方案1	方案2
储能系统投资成本/万元	35 159	33 820
风光未利用惩罚成本/万元	11 200	9 484.6

结合表2与表4, 方案2中考虑将数据中心由东部地区迁往西部地区相比方案1数据中心建在东部地区, 降低风光未利用惩罚成本15%, 降低储能系统投资成本4%。综合各项分析, 方案2的年综合费用更低, 清洁能源消纳率更高, 表明在“东数西算”背景下将数据中心纳入电网规划中有利于西部地区清洁能源的就地消纳并减少电网输电线路的投资费用, 得到的规划方案更优。

4.4 不同算法规划结果分析

为了验证双层规划方案的有效性, 引入了单层规划方案即方案3, 单层规划方案采用与方案2双层规划方案相同的参数、策略对电网进行规划, 并采用相同算法求解。在单层规划方案中, 将双层规划方案的上

下层目标函数转化为单层多目标函数, 对多目标函数赋予权重, 并对各目标函数值进行归一化处理。将双层规划方案的方案2与单层规划方案的方案3进行结果对比, 如表5和图11所示。

表 5 双单层规划方案结果对比

Table 5 Comparison of results of double/single-storey planning schemes

对比项目	方案2	方案3
扩展线路条数	4-16(2), 9-16(1), 6-7(1), 7-13(1), 16-17(1)	4-16(3), 9-16(1), 6-7(1), 7-13(1), 16-17(1)
线路建设成本/万元	152 625	164 625
储能系统投资成本/万元	33 820	35 503
风光未利用惩罚成本/万元	9 484.6	9 605.8

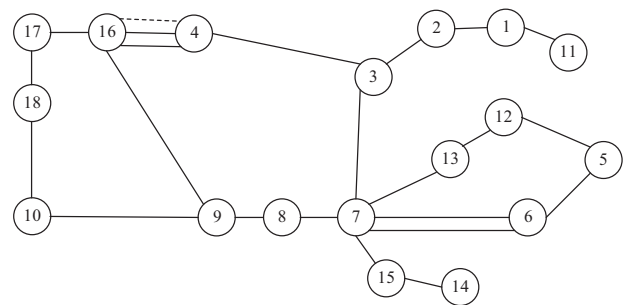


图 11 双单层网架规划方案结果对比

Fig. 11 Comparison of results of double/single-layer network frame planning schemes

由表5数据可知, 在消纳清洁能源方面, 采用单层规划模型使得储能系统的投资成本、风光未利用惩罚成本偏高, 说明采用单层规划方案的清洁能源消纳效果较差。结合图7与图11可知, 在电网规划经济性方面, 虽然方案3相比方案1少了2条线路, 节约线路投资成本43%, 但方案3相比方案2多了1条线路, 线路投资成本提高了8%, 可见双层规划模型结果优于单层规划模型。

5 结论

在“东数西算”背景下, 探究了不同位置数据中心对电网规划的影响。从数据中心耗电量大、用电成本高及西部地区清洁能源消纳的角度, 提出考虑数据中心在内的电网规划双层模型。采用改进型粒子群算法和YALMIP联合求解, 并在改进的18节点系统上进

行了仿真测试,重点分析了在电网规划中将数据中心由东部地区迁移到西部地区对其经济效益、清洁能源消纳的影响程度。

算例仿真结果表明,在电网规划中,将数据中心迁移至西部地区并对储能系统进行合理优化配置不仅可以促进西部地区清洁能源的就地消纳,且能减少输电线路上远距离传输的功率,从而提高了电网规划方案的经济性。

参考文献

- [1] 余潇潇, 宋福龙, 周原冰, 等. “新基建”对中国“十四五”电力需求和电网规划的影响分析[J]. 中国电力, 2021, 54(7): 11-17.
YU Xiaoxiao, SONG Fulong, ZHOU Yuanbing, et al. Investigations on the impact of new infrastructure on electricity forecast and power system planning during the 14th five-year plan period[J]. Electric Power, 2021, 54(7): 11-17(in Chinese).
- [2] LIU Y N, WEI X X, XIAO J Y, et al. Energy consumption and emission mitigation prediction based on data center traffic and PUE for global data centers[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 272-282.
- [3] 张子仪, 蔡泽祥, 郭采珊, 等. 面向泛在电力物联网的分布式云数据中心优化选址[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 36-42.
ZHANG Ziyi, CAI Zexiang, GUO Caishan, et al. Optimization of distributed cloud computing data center layout for ubiquitous power Internet of Things[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 36-42(in Chinese).
- [4] 全球能源互联网发展合作组织. 中国“十四五”电力发展规划研究[R]. 北京: 全球能源互联网发展合作组织, 2020.
- [5] 李大伟, 宋春晓, 李斌, 等. 电力区块链基础设施架构及其设计与实现[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 93-100.
LI Dawei, SONG Chunxiao, LI Bin, et al. Blockchain technology in power system: infrastructure architecture, design and implementation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 93-100(in Chinese).
- [6] 刘景丰, 柚李Youli. 算力向西, 下一盘大棋[J]. 大数据时代, 2022(5): 6-20.
LIU Jingfeng, Youli. Play a long game to move computing power westward[J]. Big Data Time, 2022(5): 6-20(in Chinese).
- [7] 工业和信息化部. 关于数据中心建设布局的指导意见[R]. 北京: 工业和信息化部, 2013.
- [8] 桑丙玉, 王德顺, 杨波, 等. 基于经济性的互联网数据中心光-储协同优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 131-138.
SANG Bingyu, WANG Deshun, YANG Bo, et al. Collaborative optimization configuration of photovoltaic-energy storage based on economy in an Internet data center[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 131-138(in Chinese).
- [9] LI J, BAO Z, LI Z Y. Modeling demand response capability by Internet data centers processing batch computing jobs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 737-747.
- [10] WANG H, HUANG J W, LIN X J, et al. Proactive demand response for data centers: a win-win solution[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3): 1584-1596.
- [11] 吴云芸, 方家琨, 艾小猛, 等. 计及多种储能协调运行的数据中心实时能量管理[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 82-89.
WU Yunyun, FANG Jiakun, AI Xiaomeng, et al. Real-time energy management of data center considering coordinated operation of multiple types of energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 82-89(in Chinese).
- [12] 温正楠, 刘继春. 风光水互补发电系统与需求侧数据中心联动的优化调度方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2449-2460.
WEN Zhengnan, LIU Jichun. A optimal scheduling method for hybrid wind-solar-hydro power generation system with data center in demand side[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2449-2460(in Chinese).
- [13] SEDGHI M, AHMADIAN A, ALIAKBAR-GOLKAR M. Optimal storage planning in active distribution network considering uncertainty of wind power distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 304-316.
- [14] 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.
- [15] 鲁宗相, 李昊, 乔颖. 从灵活性平衡视角的高比例可再生能源电力系统形态演化分析[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 12-18.
LU Zongxiang, LI Hao, QIAO Ying. Morphological evolution of power systems with high share of renewable energy generations from the perspective of flexibility balance[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 12-18(in Chinese).
- [16] 徐昊亮, 靳攀润, 姜继恒, 等. 基于随机生产模拟的火电灵活性改造容量规划[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(4): 393-403.
XU Haoliang, JIN Panrun, JIANG Jiheng, et al. Capacity optimal plan of thermal power flexibility transformation based on probabilistic production simulation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(4): 393-403(in Chinese).
- [17] AGHAEI J, AMJADY N, BAHARVANDI A, et al. Generation and transmission expansion planning: MILP-based probabilistic model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1592-1601.
- [18] DAVIES G F, MAIDMENT G G, TOZER R M. Using data centres for combined heating and cooling: an investigation for London[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 94: 296-304.
- [19] 吕佳炜, 张沈习, 程浩忠, 等. 集成数据中心的综合能源系统能量流-数据流协同规划综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5500-5521.
LYU Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al.

- Review and prospect on coordinated planning of energy flow and workload flow in the integrated energy system containing data centers[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5500-5521(in Chinese).
- [20] 祁兵, 曹望璋, 李彬, 等. 计及负载特征及响应特性的多数据中心双层优化模型[J/OL]. 电力系统自动化: 1-20.
QI Bing, CAO Wangzhang, LI Bin, et al, Multi data center double-layer optimization model considering load characteristics and response characteristics [J/OL]. Automation of electric power systems: 1-20(in Chinese).
- [21] 兰洲, 蒋晨威, 谷纪亭, 等. 促进可再生能源发电消纳和碳减排的数据中心优化调度与需求响应策略[J]. 电力建设, 2022, 43(4): 1-9.
LAN Zhou, JIANG Chenwei, GU Jiting, et al. Optimal dispatch and demand response strategies of data centers for promoting accommodation of renewable energy generation and reducing carbon emission[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(4): 1-9(in Chinese).
- [22] 姜惠兰, 安星, 王亚微, 等. 基于改进NSGA2算法的考虑风机接入电能质量的多目标电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5405-5411.
JIANG Huilan, AN Xing, WANG Yawei, et al. Improved NSGA2 algorithm based multi-objective planning of power grid with wind farm considering power quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5405-5411(in Chinese).
- [23] ZHANG S X, CHENG H Z, WANG D, et al. Distributed generation planning in active distribution network considering demand side management and network reconfiguration[J]. Applied Energy, 2018, 228: 1921-1936.
- [24] 赵洪山, 陈亮. 输电线扩展规划分支定界算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 60-66.
ZHAO Hongshan, CHEN Liang. Transmission line expansion planning branch and bound method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 60-66(in Chinese).
- [25] 卢志刚, 董玉香. 基于改进二进制粒子群算法的配电网故障恢复[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 39-43.
LU Zhigang, DONG Yuxiang. Distribution system restoration based on improved binary particle swarm optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(24): 39-43(in Chinese).
- [26] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.

收稿日期: 2022-06-26; 修回日期: 2022-09-15。



卢子敬

作者简介:

卢子敬(1979), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划与运行, E-mail: 13701161@qq.com。

邓艺欣(1999), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划、新能源及配电网管理, E-mail: 820778541@qq.com。

蒋霖(1963), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为大电网规划、电力系统分析等, E-mail: jxz1022@sina.cn。

李金雨(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划与运行、信息通信技术与电网融合等, E-mail: ncepuljy@163.com。

刘子嫣(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为电网规划与调度, E-mail: liuziyan131@163.com。

梁海峰(1976), 男, 副教授, 研究方向为电力系统规划与运行、微电网技术、新型输配电技术和电动汽车与电网等。通信作者, E-mail: hfliang@ncepu.edu.cn。

张铁峰(1974), 男, 副教授, 研究方向为配电网规划决策、智能配用电分析与处理等, E-mail: ncepuztf@126.com。

(责任编辑 张宇)

附录A 改进的18节点系统算例参数

表 A1 各节点负荷参数

Table A1 Load parameters of each node

节点	负荷/MW	节点	负荷/MW
1	1550	9	3000
2	1440	10	1170
3	2770	11	1700
4	2190	12	2650
5	1500	13	2000
6	1500	14	1850
7	2000	15	2800
8	1800	16	5000
		17	800

表A2 发电机参数

Table A2 Generator parameters

节点	发电机容量/MW
3	1500
5	1100
7	1300
13	1375
16	1900
18	1355

表A3 待建线路参数

Table A3 Parameters of the line to built

首节点	末节点	线路容量/MW	可建设线路数/条	距离/km	线路电抗/pu
4	16	1000	3	80	0.050 1
4	7	1000	2	659	0.050 1
9	16	1000	2	530.3	0.050 1
3	7	1000	1	160	0.032 5
6	7	1000	1	85.2	0.012 6
7	13	1000	1	184	0.012 6
9	10	1000	2	549	0.050 1
16	17	1000	1	58	0.015 3
6	14	1000	1	188	0.055 4
5	11	1000	1	98	0.015 3

表A4 已建线路参数

Table A4 Built line parameters

首节点	末节点	线路容量/MW	距离/km	线路电抗/pu
1	2	1000	50	0.017 6
2	3	1000	40	0.034 8
3	4	1000	535	0.040 4
3	7	1000	160	0.032 5
5	6	1000	55	0.026 7
6	7	1000	85.2	0.012 6
7	8	1000	53	0.015 1
8	9	1000	33	0.010 2
9	10	1000	549	0.050 1
10	18	1000	69	0.025 5
14	15	1000	190	0.042 8
17	18	1000	12	0.014 0
5	12	1000	104	0.044 8
1	11	1000	79	0.010 2
12	13	1000	132	0.044 8
7	15	1000	110	0.010 2

JGEEI