

考虑源网荷储协调的主动配电网优化调度方法研究

罗金满¹, 刘丽媛¹, 刘飘¹, 叶睿菁¹, 覃朋²

(1. 广东电网有限责任公司东莞供电局信息中心, 广东 东莞 523000;

2. 南方电网深圳数字电网研究院有限公司, 广东 深圳 518053)

摘要: 针对源网荷储的一体化运行目标, 提出一种考虑源网荷储的主动配电网协调运行调度方法。基于多时间尺度的思想, 以最小化可调节量和最大程度地增加新能源消纳为目标, 建立一个具有两个互补时间尺度的主动配电网日前-日内优化调度模型, 将差分进化算法和帝国竞争算法相结合求解最优调度模型。仿真验证了所提出的多源协同调度方法的优越性。仿真结果表明, 该方法可有效减少负荷波动和运行成本, 使新能源消纳增加9.1%, 具有一定的实用性。

关键词: 主动配电网; 源网荷储; 优化调度模型; 帝国竞争算法; 微分进化算法

An optimal scheduling method for active distribution network considering source network load storage coordination

LUO Jinman¹, LIU Liyuan¹, LIU Piao¹, YE Ruijing¹, QIN Peng²

(1. Dongguan Power Supply Bureau Information Center, Guangdong Power Grid Corporation, Dongguan 523000, China;

2. Southern Power Grid Shenzhen Digital Grid Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518053, China)

Abstract: Aiming at the integrated operational goal of source network load and storage, an active distribution network coordinated operation scheduling method considering source network load and storage is proposed. Based on the idea of multiple timescales, a day ahead day optimal dispatch model of an active distribution network with two complementary timescales is established with the objective of minimizing the adjustable quantity and maximizing the new energy consumption. A differential evolution algorithm and empire competition algorithm are combined to solve the optimal scheduling model. Simulation verifies the superiority of the proposed method. The simulation results show that this method can effectively reduce the load fluctuation and operational cost, increase the new energy consumption rate by 9.1%, and has clear practicality.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. 031900HK42200008).

Key words: active distribution network; source network load storage; optimal scheduling model; imperial competitive algorithm; differential evolution algorithm

0 引言

随着我国经济的飞速发展, 用电负荷也在不断增加, 传统资源越来越匮乏^[1]。在这种情况下, 基于新能源的分布式发电在电网中起着越来越重要的作用。随着高比例可控分布式发电、柔性负荷、储能系统等设备的接入, 逐渐过渡到主动配电网^[2]。由于分布式发电的随机性和多种类型负荷波动的叠

加给配电网的运行和控制带来了很大的挑战。如何提高系统的运行效率, 对考虑源网荷储的主动配电网进行优化调度, 使系统实现最优运行是一个亟待解决的问题。

目前, 国内外许多学者对“源网荷储”协同优化调度进行了大量研究, 并取得了一定的成果。文献[3]提出了一种考虑“源网荷”的协同优化方法, 以网损最小为目标, 并从“源、源”输出配置和储能最优接入点、最优接入容量、峰值负荷计算等方面进行了分析。文献[4]提出一种考虑“源网荷储”

基金项目: 南方电网公司科技项目资助 (031900HK42200008)

的协调优化调度模型,通过改进遗传算法求解模型。仿真结果表明,该方法可以有效降低配电网的运行成本,提高新能源的消纳能力。文献[5]提出了一种考虑源网荷的主动配电网规划方法,建立了一个以投资者利润最大化、光伏就地消纳最大化为目标的函数,通过改进差分进化算法进行求解。结果表明,该方法有效提高了光伏就地消纳能力,提高了投资者收益。文献[6]提出了一种考虑源网荷储协调优化的配电网多目标调度方法。该方法考虑了源网荷储之间的相互作用,建立了多电压等级含光伏的直流配电网多目标优化调度模型。仿真结果表明,该源网荷储交互模型可以显著降低系统运行成本、网络损耗率和电压偏差,并有效提高光伏消纳水平。但是,以上研究不能准确反映可控分布式能源和不同负荷随机性等因素对主动配电网最优分配策略的影响,适应性有待进一步加强。

基于此,本文提出一种考虑源网荷储的主动配电网协调运行调度方法,建立了多时间尺度的日前-日内优化调度模型,结合差分进化算法和帝国竞争算法对模型进行求解,并通过仿真对其进行分析。

1 调度系统架构

图1所示为“源网荷储”协调优化系统的结构。由四个部分组成:电源、电网、负荷和储能^[7]。优化模型主要考虑以下目标:能耗和储能设备损耗最低,发挥用户侧和储能侧的作用。其中,协同优化算法主要通过云计算和边缘计算的协同计算模式,在电网侧实现。

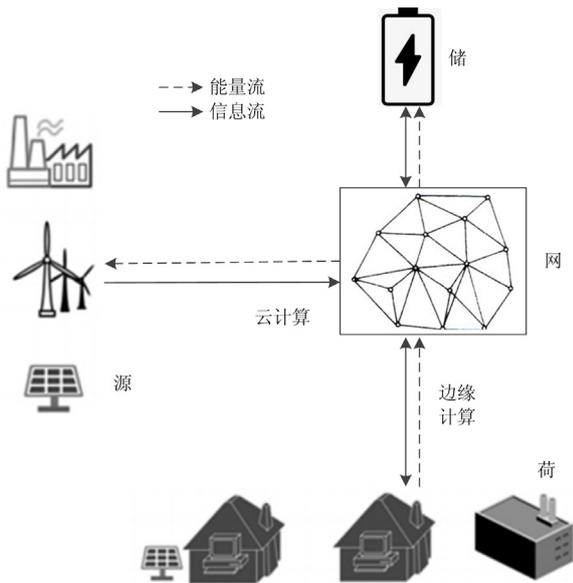


图1 调度系统架构

Fig. 1 Dispatching system architecture

(1) 源。通过可控分布式发出的输出时序特性和空间分布特性进行互补,可减少功率波动对系统运行的影响,提高消纳能力^[8]。

(2) 网。根据实时状态和历史数据,合理分配电网中的可调度资源,并对整个网络资源进行协调,以确保主动配电网的最优运行^[9]。

(3) 荷。与“源”、“网”协调互动,以引导用户改变用电方式,降低用电成本,削峰填谷并缓解网络拥塞。

(4) 储。储能单元可以根据系统的调度指令快速调整充电和放电功率。由于其响应速度快,不仅可以长时间削峰填谷,还可以“低储高发”,提高运营的经济性。

2 调度模型

风能和太阳能等新能源的预测值与负荷侧用电量预测值之间存在时间差^[10]。因此,文中建立一个具有两个互补时间尺度的主动配电网日前-日内优化调度模型,其结构如图2所示。

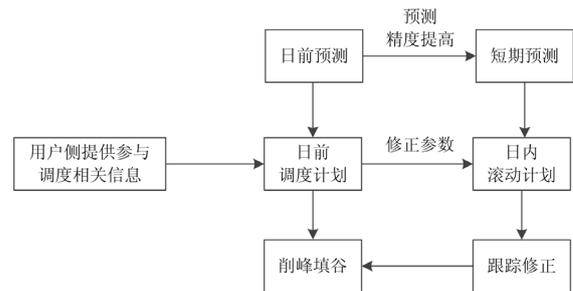


图2 模型结构

Fig. 2 Model structure

2.1 日前调度模型

日前调度是通过历史数据和调度日的天气预报,预测调度日新能源出力 and 负荷量,然后根据历史数据制定调度日计划。

(1) 目标函数

文中日前调度是使主动配电网的总运行费用最小,如式(1)所示^[11]。

$$\min f_1 = C_{DS} + C_{ES} + C_{RY} - C_{EC} \quad (1)$$

式中: C_{DS} 为可控调度成本,包括柔性负荷、电动汽车、储能、可控分布式电源调度成本; C_{ES} 为上级电网购电成本; C_{RY} 为可控能源运维成本; C_{EC} 为电动汽车充电成本。

(2) 约束条件

日前调度受主动配电网技术指标的约束,包括节点电压、功率平衡、电动汽车、储能、可控分布式发电、柔性负荷等。

节点电压约束如式(2)所示^[12]。

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (2)$$

式中, U_i^{\max} 、 U_i^{\min} 分别为节点 i 电压的上、下限。

功率平衡约束条件如式(3)所示^[13]。

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M P_{CDG,m}^t + P_{WT}^t + P_{PV}^t + P_{LOSS}^t + P_{ES}^t + \\ & \sum_{x=1}^X P_{XJ,x}^t + \sum_{j=1}^J P_{ESS,j}^t + \sum_{i=1}^I P_{EV,i}^t = P_L^t \end{aligned} \quad (3)$$

式中: P_{WT}^t 、 P_{PV}^t 为 t 时刻的新能源消纳量; P_{ES}^t 为 t 时刻与上级电网交互功率; $P_{CDG,m}^t$ 为 m 节点可控分布式能源在 t 时刻的消纳量; P_{LOSS}^t 、 $\sum_{x=1}^X P_{XJ,x}^t$ 分别为 t 时刻损耗量和总削减量; $\sum_{i=1}^I P_{EV,i}^t$ 为电动汽车集群在 t 时刻的总充/放电量。

电动汽车约束条件如式(4)所示^[14]。

$$\begin{cases} S_{EV,\min} \leq S_{EV,i} \leq S_{EV,\max} \\ -P_{c,i} / \eta_c \leq P_{EV,i}^t \leq P_{d,i} / \eta_d \\ S_{B,i} + \left(\sum_{t \in T_{m,j}} P_{EV,i}^t \Delta t \right) / E_{s,i} \geq S_{E,i} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $S_{EV,\max}$ 、 $S_{EV,\min}$ 分别为电动汽车 SOC 的上下限; $P_{c,i}$ 、 $P_{d,i}$ 分别为 i 节点电动汽车的额定充放电容量; η_c 、 η_d 分别为充放电转换率。

储能约束条件如式(5)所示^[15]。

$$\begin{cases} P_{ESS,\min}^t \leq P_{ESS,j}^t \leq P_{ESS,\max}^t \\ SOC_{\min,j}^t \leq SOC_j^t \leq SOC_{\max,j}^t \\ S_{ESS,i}(end) = S_{ESS,i}(0) \end{cases} \quad (5)$$

式中, SOC_j^t 为第 j 个储能装置在 t 时刻的荷电状态。

可控分布式发电的条件如式(6)所示^[16]。

$$\begin{cases} P_{CDG,m}^{\min} \leq P_{CDG,m}^t \leq P_{CDG,m}^{\max} \\ |P_{CDG,m}^t - P_{CDG,m}^{t-1}| \leq R_{Lim,m} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{CDG,m}^{\max}$ 、 $P_{CDG,m}^{\min}$ 分别为 m 节点 CDG 输出功率上下限; $P_{CDG,m}^t$ 、 $P_{CDG,m}^{t-1}$ 分别为 t 时刻和 $t-1$ 时刻的输出; $R_{Lim,m}$ 为上下坡限值。

柔性负荷约束条件如式(7)所示^[17]。

$$P_{XJ,x}^{\min} \leq P_{XJ,x}^t \leq P_{XJ,x}^{\max} \quad (7)$$

式中, $P_{XJ,x}^{\max}$ 、 $P_{XJ,x}^{\min}$ 分别为可削减负荷 x 的上下限。

2.2 日内调度模型

日内调度以日前调度量为状态值, 电动汽车和

柔性负荷保持不变, 对可再生分布式发电进行超短期预测。进一步优化储能单元和可控分布式发电。

(1) 目标函数

日内调度的目标是使可调度单元和日前调度的调整量最小, 并最大程度地增加新能源的消纳。

目标函数如式(8)和式(9)所示。

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^H \alpha (P_{DD,\text{ref}}^t - P_{DD}^t) \quad (8)$$

$$\min f_3 = \frac{\sum_{t=1}^H P_{RES}^t}{\sum_{t=1}^H (P_{WT}^t + P_{PV}^t)} \quad (9)$$

式中: α 为惩罚因子; $P_{DD,\text{ref}}^t$ 、 P_{DD}^t 分别为 t 时刻日内和日前优化调度计划值; $P_{RES}(t)$ 为 t 时刻可再生能源的总发电功率。

(2) 约束条件

由于日内优化调度单元远小于日前调度, 因此相应的约束也减少了^[18]。约束包括功率平衡、储能、可控的分布式发电和节点电压约束。储能约束、可控的分布式发电约束和节点电压约束与之前的约束相同, 在此不再赘述。

功率平衡约束如式(10)所示。

$$\sum_{m=1}^M P_{CDG,m}^t + P_{WT}^t + P_{PV}^t + P_{LOSS}^t + P_{ES}^t + \sum_{j=1}^J P_{ESS,j}^t = P_L^t \quad (10)$$

2.3 求解算法

帝国竞争算法 (Imperialist Competitive Algorithm, ICA) 是一种通过帝国主义殖民竞争机制的进化算法, 在 2007 年被提出^[19]。如今, ICA 已成功应用于许多优化问题, 如调度和分类等, 具体步骤如下:

(1) 初始化

ICA 的个人是国家, 与染色体类似。对于 N 维优化问题, 可用式(11)表示国家。

$$\text{country} = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_n] \quad (11)$$

一个国家的实力是通过成本函数来衡量的, 如式(12)所示^[20]。

$$f(\text{country}) = f(p_1, p_2, p_3, \dots, p_n) \quad (12)$$

随机产生 N_{pop} 个国家, 其中前 N_{imp} 个权力较大的国家被选为帝国主义国家, 其余 N_{col} 个国家被选为殖民地。

(2) 殖民同化

帝国主义国家向殖民地国家传播了自己的思想和文化习俗, 称为同化^[21]。ICA 将殖民地国家向帝国主义转移来模拟同化过程。殖民地权利大于帝国主

义国家则互换位置。从殖民地到帝国的距离如式(13)所示。

$$x \sim U(0, \beta \times d) \quad (13)$$

式中: $\beta > 1$; d 为两者之间的距离。

(3) 帝国竞争

帝国通过竞争占领和控制弱小帝国的殖民地, 总势力如式(14)所示^[22]。

$$TC_n = f(imp_n) + \xi \times \frac{\sum_{i=1}^N f(Col_i)}{NC_n} \quad (14)$$

式中: TC_n 为第 n 个帝国的总势力大小; imp_n 为第 n 个帝国主义国家; ξ 为影响因子, 取值在 0~1。

(4) 帝国灭亡

帝国通过竞争使弱小的帝国不断减少, 最终剩下一个帝国, 算法结束^[23]。但是, 算法交互可能会导致计算偏差。文中使用差分进化算法来优化 ICA, 改进方法如下。

① 对于当前帝国的所有殖民地 Col , 根据差分变异概率 MR 进行差分变异, 如式(15)所示。

$$C = Col_{r_3} + F(Col_{r_1} - Col_{r_2}) + rand(imp_{best} - Col) \quad (15)$$

式中: Col_{r_1} 、 Col_{r_2} 、 Col_{r_3} 分别为三个随机选择的殖民地个体; F 为缩放因子, 在 0.5~1 之间取值; $rand$ 为 0~1 之间的随机数; imp_{best} 为全局最优值。

② 第一步中生成的殖民地 C 与现有殖民地 Col , 进行微分交叉, 生成新的殖民地 D 。微分交叉如式(16)所示^[24]。

$$D_i = \begin{cases} C_i, & rand < CR \\ Col, & otherwise \end{cases} \quad (16)$$

式中, CR 为交叉概率。

③ 对殖民地 D 和 Col 进行代价函数值判断, 若 $D > Col$, 则 D 进行下一次迭代^[25]。否则, 保留 Col , 使个体之间的竞争力加强, 取得了较好的改进效果。

差分进化算法优化的 ICA 过程如图 3 所示。

3 仿真结果与分析

3.1 仿真参数

为了验证所提出调度方法的有效性和实用性, 以 IEEE33 为例, 通过 Matlab 仿真, IEEE33 节点系统 6 和 7 节点分布式光伏(Photo Voltaic, PV)、储能(Energy Storage System, ESS)、柔性负荷(Flexible Load, FL), 将电动汽车(Electric Vehicle, EV)集群负载加入网络中的 12 节点, 将可控的分布式发电 MT 添加到网络中的 29 节点, 电压等级和基准功率分别为 12.66 kV、10 MVA, 上传低压侧总线与节点 0

相连。图 4 所示为 IEEE33 配电网节点。文中的目的是提高可控能源的利用率。PV 和 WT 均在 MPPT 模式下运行。各 PV 和 WT 容量分别为 1 000 kW 和 1 500 kW。新能源发电的功率因数为 0.95, 电池的最大充放电功率为 500 kW, 群集总数设置为 25。电动汽车的聚类分析表明, 电动汽车的入/离网时间遵循正态分布。根据用户的需求, 电动汽车的调度时间为下午 17 点至次日早上 9 点。

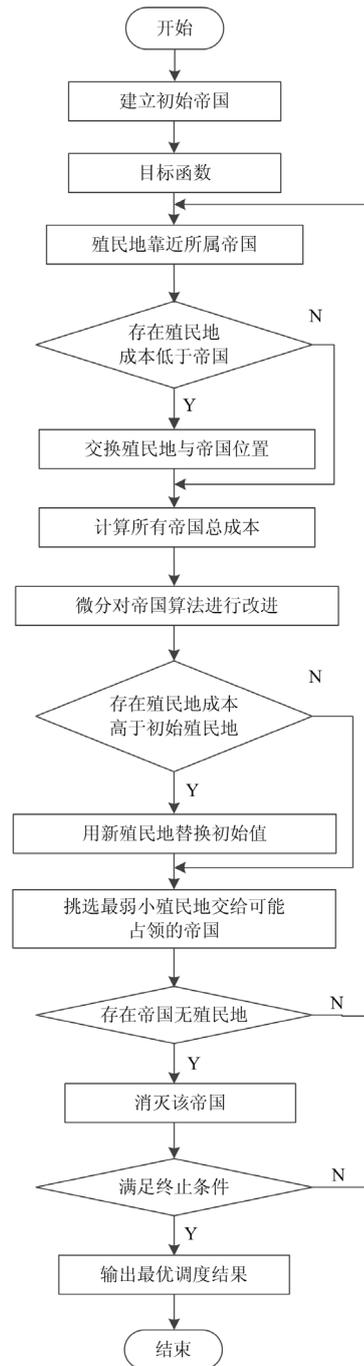


图 3 改进算法流程图

Fig. 3 Flow chart of improved algorithm

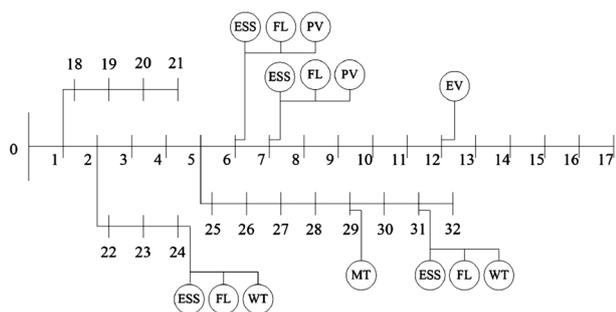


图4 IEEE33 配电网节点

Fig. 4 IEEE33 distribution network node

3.2 日前优化结果分析

WT、PV、负荷、可控分布式发电未优化的 24 h 预测结果如图 5 所示。

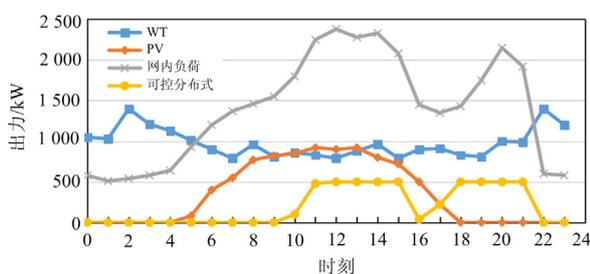


图5 预测结果

Fig. 5 Forecast results

由图 5 可知，主动配电网负荷随时间呈明显的峰谷变化。峰值主要集中在 13 点至 20 点左右；负载谷时间主要集中在午夜和凌晨。

长时间尺度以 1 h 为单位，每天 24 h，制定 24 个调度方案^[26]。主动配电网的优化结果如图 6 所示。

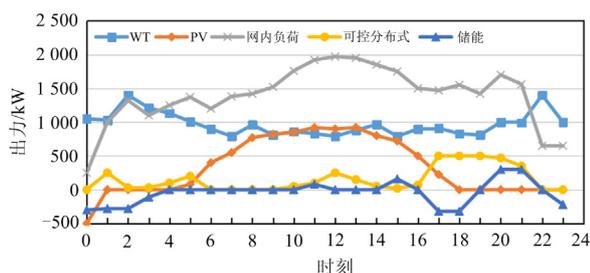


图6 优化调度结果

Fig. 6 Optimal scheduling results

由图 5 和图 6 可知，在优化前后的负载曲线中，峰谷之间存在明显的差异，优化后削峰填谷变化明显。通过对多种资源的调度，负荷峰谷差明显减少。上述结果表明，该优化模型准确可靠。

为了在日内调度中更好地消纳新能源，不再对

柔性负荷和电动汽车集群进行调度，在日前调度下确定柔性负荷和电动汽车集群调度量。调度情况如图 7 所示。

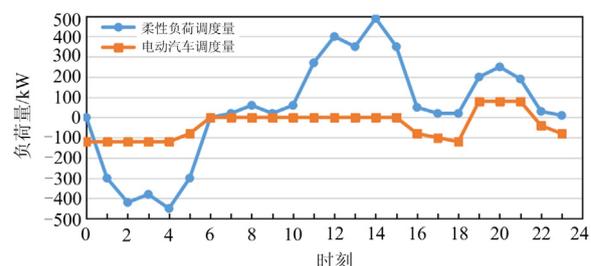


图7 调度情况

Fig. 7 Scheduling condition

长时间尺度下多源协同优化调度的目标是最大程度地减少调度日主动配电网的运行成本。根据以上结果，表 1 为长时间尺度多源协同优化调度下主动配电网调度日运行成本与优化前成本的对比。

表 1 优化前后成本参数对比

Table 1 Comparison of cost parameters before and after optimization

参数	优化前	优化后
集群调度成本/元	0	535.20
购电成本/元	800.12	388.23
发电成本/元	24 384.80	16 601
售电收入/元	577.20	200.20
柔性负荷调度成本/元	0	623.40
调度总成本/元	24 607.72	17 947.56

由表 1 可以看出，在成本优化的第一阶段，电动汽车集群和柔性负荷调度的成本分别增加了 535.2 元和 632.4 元，售电、购电、发电分别降低了 377 元、411.89 元、7 783.80 元。综上所述，优化调度的总成本降低了约 6 660 元。

3.3 日内优化结果分析

日内调度以日前调度量为状态值，调度周期为 15 min，24 h 内总共有 96 个调度计划。日内优化调度的目标包括两个部分：日内储能和可控分布式发电变化最小和新能源消纳最大。日内优化调度的结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出，风力和光伏联合发电正好被负荷需求是在 05:00—07:00 点和 12:00—18:00，不进行购电和出售。风力发电大于负荷需求是在 00:00—02:00、03:00—05:00、23:00—24:00 点，这时向电网售电。风力和光伏联合发电大于负荷需求是在 07:00—12:00，这时向电网售电。风力和光伏联合发电小于负荷需求是在 18:00—22:00，这时从主网购电。

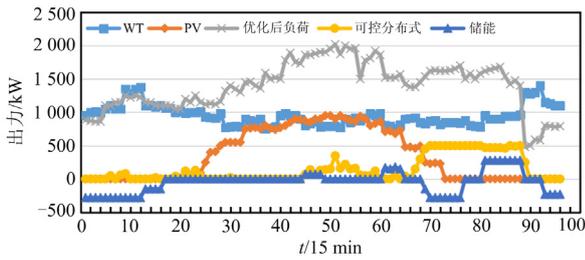


图 8 优化调度结果

Fig. 8 Optimized scheduling result

日内优化调度是在储能和可控分布式发电日前调度的基础上进行，尽可能减少两个调度单元的调整，避免过调。比较图 6 和图 8 可以看到，经过两个阶段的调度优化后，负荷曲线呈现明显的削峰填谷趋势。表 2 所示为优化前后新能源的消纳情况。

表 2 新能源消纳情况

Table 2 New energy consumption

模式	优化前	优化后
新能源消纳情况	87.21%	96.31%

由表 2 可以看出，新能源消纳情况在优化后从 87.21% 提高到 96.31%，证明了文中所提优化模型的有效性。

4 结论

文中提出了一种考虑源网荷储的主动配电网运行协同调度方法。该方法考虑了系统中源网荷储的互动关系，基于多时间尺度的思想，建立了具有两个互补时间尺度的主动配电网日前-日内优化调度模型，并将差分进化算法和帝国竞争算法相结合来求解该模型。结果表明，日前调度可以降低总成本约 6 660 元。在日内调度中，新能源消纳提高了 9.1%，实现了运营的经济性和新能源消纳的最大化。但也存在一些问题和不足，如在建模时只考虑时间尺度，而未考虑空间尺度，将在后续的研究中不断改进和完善。

参考文献

[1] 余翔, 陈国洪, 李霆, 等. 基于孤立森林算法的用电数据异常检测研究[J]. 信息技术, 2018(12): 88-98.
YU Xiang, CHEN Guohong, LI Ting, et al. Research on anomaly detection of power consumption data based on isolated forest algorithm[J]. Information Technology, 2018(12): 88-98.

[2] 张煜, 牟龙华, 王蕴敏, 等. 计及可控负荷动态调节的主动配电网优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 104-110.
ZHANG Yu, MU Longhua, WANG Yunmin, et al. Optimal dispatching of active distribution network

considering controllable load dynamic regulation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 104-110.

[3] 朱正元, 韦浩, 曾莉, 等. 基于网损最小的智能配电网“源网荷”优化研究[J]. 浙江电力, 2020, 39(5): 61-65.
ZHU Zhengyuan, WEI Hao, ZENG Li, et al. Optimization of "source network load" of intelligent distribution network based on minimum network loss[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(5): 61-65.

[4] 姜琦, 黄堃, 赵俊, 等. 基于遗传算法的主动配电网“源网荷储”协调优化模型研究[J]. 电力与能源, 2020, 41(1): 1-5, 19.
JIANG Qi, HUANG Kun, ZHAO Jun, et al. Study on coordination optimization model of "source network load storage" of active distribution network based on genetic algorithm[J]. Power and Energy, 2020, 41(1): 1-5, 19.

[5] 王一飞, 董新伟, 杨飞, 等. 基于配电网电压质量的分布式储能系统优化配置研究[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 126-133.
WANG Yifei, DONG Xinwei, YANG Fei, et al. Optimal allocation of distributed energy storage system based on voltage quality of distribution network[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 126-133.

[6] 权然, 金国彬, 陈庆, 等. 源网荷储互动的直流配电网优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(2): 41-50.
QUAN Ran, JIN Guobin, CHEN Qing, et al. Optimal dispatch of DC distribution network with source network load storage interaction[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(2): 41-50.

[7] 崔弘, 郭熠昀, 夏成军. 考虑环境效益的分布式电源优化配置研究[J]. 东北电力, 2010, 38(12): 1968-1971.
CUI Hong, GUO Yiyun, XIA Chengjun. Study on distributed power supply optimal configuration considering environmental benefits[J]. Northeast Electric Power, 2010, 38(12): 1968-1971.

[8] 谭辉, 戴小剑, 田家俊, 等. 改进粒子群算法在含 DG 配电系统可靠性评估中的应用[J]. 湖北民族学院学报, 2019, 37(1): 104-108.
TAN Hui, DAI Xiaojian, TIAN Jiajun, et al. Application of improved particle swarm optimization in reliability evaluation of distribution system with DG[J]. Journal of Hubei University for Nationalities, 2019, 37(1): 104-108.

[9] 谢飞, 夏锐. 基于动态差分和粒子群混合算法的含分布式电源配电网重构[J]. 黑龙江电力, 2018, 40(3): 221-226.
XIE Fei, XIA Rui. Distribution network reconfiguration with distributed generation based on dynamic difference and particle swarm optimization[J]. Heilongjiang Electric Power, 2018, 40(3): 221-226.

[10] 杨君, 袁琴, 董君, 等. 基于改进蝙蝠算法对含分布式电源配电网重构研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(1): 124-131.

- YANG Jun, YUAN Qin, DONG Jun, et al. Research on distribution network reconfiguration with distributed generation based on improved bat algorithms[J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2018, 39(1): 124-131.
- [11] 陈思宇, 柴庆宣, 李延松, 等. 综合能源系统潮流及最优潮流计算模型与方法综述[J]. 热力发电, 2020, 49(7): 1-12.
- CHEN Siyu, CHAI Qingxuan, LI Yansong, et al. Overview of power flow and optimal power flow calculation models and methods for integrated energy systems[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(7): 1-12.
- [12] NAHMAN J, SALAMON D. Mutual interference of neighboring grounding systems and approximate formulation[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 41(12): 151-156.
- [13] MOSES V, HATHERLEY R, BISHOP Ö T. Bioinformatic characterization of type-specific sequence and structural features in auxiliary activity family 9 proteins[J]. Biotechnology for Biofuels, 2016, 9(1): 88-94.
- [14] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 119-125.
- [15] PATEL G K, DABHI V K, PRAJAPATI H B. Clustering using a combination of particle swarm optimization and K-means[J]. Journal of Intelligent Systems, 2017, 12(3): 457-469.
- [16] GAUTAM J V, PRAJAPATI H B, DABHI V K, et al. Empirical study of job scheduling algorithms in Hadoop MapReduce[J]. Cybernetics and Information Technologies, 2017, 21(1): 146-163.
- [17] CAETANO C E F, LIMA A B, PAULINO J O S, et al. A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 46(5): 159-162.
- [18] HU Jianjiang, FICHTNER M, BARICCO M. Preparation of Li-Mg-N-H hydrogen storage materials for an auxiliary power unit[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(27): 17144-17148.
- [19] JIA Zhiwei, WANG Lijun, ZHANG Jinchuan, et al. High efficiency, low power-consumption DFB quantum cascade lasers without lateral regrowth[J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12(1): 88-95.
- [20] 张婕, 曾国辉, 赵晋斌, 等. 基于改进冒泡排序的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 92-99.
- ZHANG Jie, ZENG Guohui, ZHAO Jinbin, et al. Capacitor voltage equalization strategy for modular multilevel converter based on improved bubble sorting[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 92-99.
- [21] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波. 基于 MMC 的环状直流配网在不同接地方式下的故障特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 1-10.
- DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo. Fault characteristics analysis of circular DC distribution network under different grounding modes based on MMC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 1-10.
- [22] 王利平, 庞晓艳, 朱雨, 等. 基于物联网和移动互联网的二次设备运维技术研究与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 177-184.
- WANG Liping, PANG Xiaoyan, ZHU Yu, et al. Research and application of secondary equipment operation and maintenance technology based on internet of things and mobile interconnection[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 177-184.
- [23] 唐耀华, 郭为民, 崔杨. 水-火发电机组频率控制策略研究[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 153-161.
- TANG Yaohua, GUO Weimin, CUI Yang. Study on frequency control strategy of water thermal power unit[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 153-161.
- [24] 顾志祥, 孙思宇, 孔飞, 等. 燃气冷热电分布式能源系统设计优化综述[J]. 华电技术, 2019, 41(3): 8-13, 42.
- GU Zhixiang, SUN Siyu, KONG Fei, et al. Design optimization of gas cooling, heating and power distributed energy system[J]. Huadian Technology, 2019, 41(3): 8-13, 42.
- [25] 叶亮, 吕智林, 王蒙, 等. 基于最优潮流的含多微网的主动配电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 27-37.
- YE Liang, LÜ Zhilin, WANG Meng, et al. Bilevel optimal dispatching of active distribution network with multi microgrid based on optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 27-37.
- [26] 凌万水, 刘刚. 基于鲁棒优化的主动配电网分布式电源优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 141-148.
- LING Wanshui, LIU Gang. Distributed generation optimal allocation method for active distribution network based on robust optimization[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 141-148.

收稿日期: 2021-03-31; 修回日期: 2021-05-26

作者简介:

罗金满(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为综合能源管理及信息技术等; E-mail: luojinman1985@163.com

刘丽媛(1993—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为综合能源管理及电力系统保护;

刘 飘(1993—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为人工智能。

(编辑 张爱琴)