

基于异构网络优化与自适应负荷管理的多微电网调度策略研究

董 硕¹, 尉鹏程², 郝建锋¹, 黄久鸿¹

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132011;

2. 国网吉林省电力有限公司长春供电公司, 吉林 长春 130012)

摘要: 针对多微电网调度策略进行研究, 提出一种基于异构网络优化与自适应负荷管理的多微电网调度策略。该策略充分利用了多微电网中不同能源网络的互补与协同特性, 设计了一种基于 Prophet 时间序列模型的自适应负荷管理策略, 并引入能源协同性指数和能源互补性指数构建异构网络优化模型, 运用多目标混合蚁群算法实现多目标优化, 旨在保证系统稳定运行的前提下, 实现能源的高效利用和负荷平衡。实验结果表明, 该方法能够提高多微电网系统的能源利用效率, 降低运行成本, 提高电网的稳定性和可靠性。

关键词: 多微电网调度; 自适应负荷管理; 异构网络优化; 多目标混合蚁群算法

Research on multi-microgrid scheduling strategy based on heterogeneous network optimization and adaptive load management

DONG Shuo¹, WEI Pengcheng², HAO Jianfeng¹, HUANG Jiuhong¹

(1. Electrical Engineering College, Northeast Elctrical Power University, Jilin 132011, China;

2. State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun Power Supply Company, Changchun 130012, China)

Abstract: The research focuses on the scheduling strategy of multi-microgrids. A novel scheduling strategy, based on the optimization of heterogeneous networks combined with adaptive load management, has been proposed. This strategy fully exploits the complementary and synergistic characteristics of different energy networks within multi-microgrids. An adaptive load management approach based on the Prophet time-series model has been designed. Moreover, indices of energy synergy and energy complementarity are introduced to construct a model for optimizing heterogeneous networks. A multi-objective hybrid ant colony optimization algorithm is employed to achieve multi-objective optimization. The primary aim is to ensure the stable operation of the system while achieving efficient energy utilization and load balancing. Experimental results indicate that this method enhances the energy utilization efficiency of the multi-microgrid system, reduces operational costs, and augments the stability and reliability of the electrical grid.

Key words: multi-microgrid scheduling; adaptive load management; heterogeneous network optimization; multi-objective hybrid ant colony optimization

0 引言

随着全球能源结构的变革和可再生能源的广泛应用,多微电网作为一种集成分布式能源、储能系统和负荷的局部电网系统,逐渐成为电力系统发展的重要趋势^[1]。多微电网具有清洁、高效、可靠和经济等优点,能够有效提高能源利用率,降低碳排放,缓解电力系统压力,提升电力供应安全性。此外,多微电网的发展有利于提高能源系统的灵活性与稳定性,促进电力市场的竞争与创新,助力构建绿色智能电网^[2]。合理的多微电网调度策略对于提高能源利用率、降低运行成本和实现电网稳定性具有重要意义。

面对全球能源变革,现有的微电网调度策略正面临异构性、负荷不确定性、交互问题、环境经济因素和规模复杂性等多重挑战。由于集成了如太阳能、风能和燃料电池等不同性质的能源供应方式,彼此间工作模式、输出特性和响应速度各异,导致整体网络具有高度异构性。此外,受到可再生能源的间歇性和电力用户行为的多样化影响,负荷管理变得尤为复杂。

基于上述挑战,深入探索多微电网中的异构网络和负荷管理,进而设计有效的调度策略显得迫切而必要。目前,多微电网调度策略研究主要关注如何合理调度各类能源系统与负荷,实现经济、环保与可靠的运行。目前已有许多关于多微电网调度策略的研究,涉及负荷预测、优化调度和鲁棒性控制等方面。文献[3]提出了计及经济性和综合能效的区域多微电网多目标优化调度方法,通过对能源系统和负荷的预测与优化,提高了多微电网的运行效率和经济性。文献[4]构建了考虑可再生能源机组出力和用户负荷不确定性的多微电网日前调度优化模型,有效缓解了可再生能源的波动性和负荷不确定性问题,提高了多微电网的稳定性和可靠性。文献[5]研究供用储设备间的冷热电能流动关系和设备的数学模型,建立考虑微电网间电能交互的冷热电联供型多微电网系统优化经济调度模型,降低了系统运行成

本,提高了系统稳定性。文献[6]针对含多微电网异构网络的分散自治特点,提出一种基于目标级联分析理论的优化调度模型和求解方法,提高了配电系统的能量优化能力。然而,由于多微电网中能源系统的异构性以及负荷的不确定性,现有的调度策略仍存在一定的局限性。特别是在面对不同类型能源系统的多样性、互补性和协同性时,如何高效地整合和调度各种能源,如何精确地预测和满足多样化的负荷需求,以及如何在复杂的运行环境中确保电网的稳定性和可靠性,都是亟待解决的重要问题。

为了解决这些问题,本文在现有研究的基础上,提出一种基于异构网络优化与自适应负荷管理的多微电网调度策略。通过对多微电网中的异构网络进行深入分析,设计有效的能源网络互补模式和协同调度策略,并基于时间序列模型构建自适应负荷管理策略,继而将两者结合建立多目标优化模型,采用多目标混合蚁群算法求解,实现多微电网负荷的高效平衡与调度。

1 异构网络优化方法

本文在含大量分布式电源的区域,以3个独立分布的子微电网为基础,应用转换器实现子微电网内部供需协调,通过公共连接点控制子微电网之间以及多微电网与上级电网间的并、离网切换,支撑微电网群协同调控运行。多微电网系统连接方式与组织结构如图1所示。

1.1 异构网络概述

在多微电网中,异构网络主要包括光伏发电系统、风力发电系统、储能系统和传统能源系统。为了实现多微电网系统的高效运作,需要深入了解并整合各种能源系统的特性,取长补短,在满足用电需求的同时,实现效益最大化。

1.2 多微电网能源系统建模

在本节中,首先对多微电网中的异构网络进行分析。

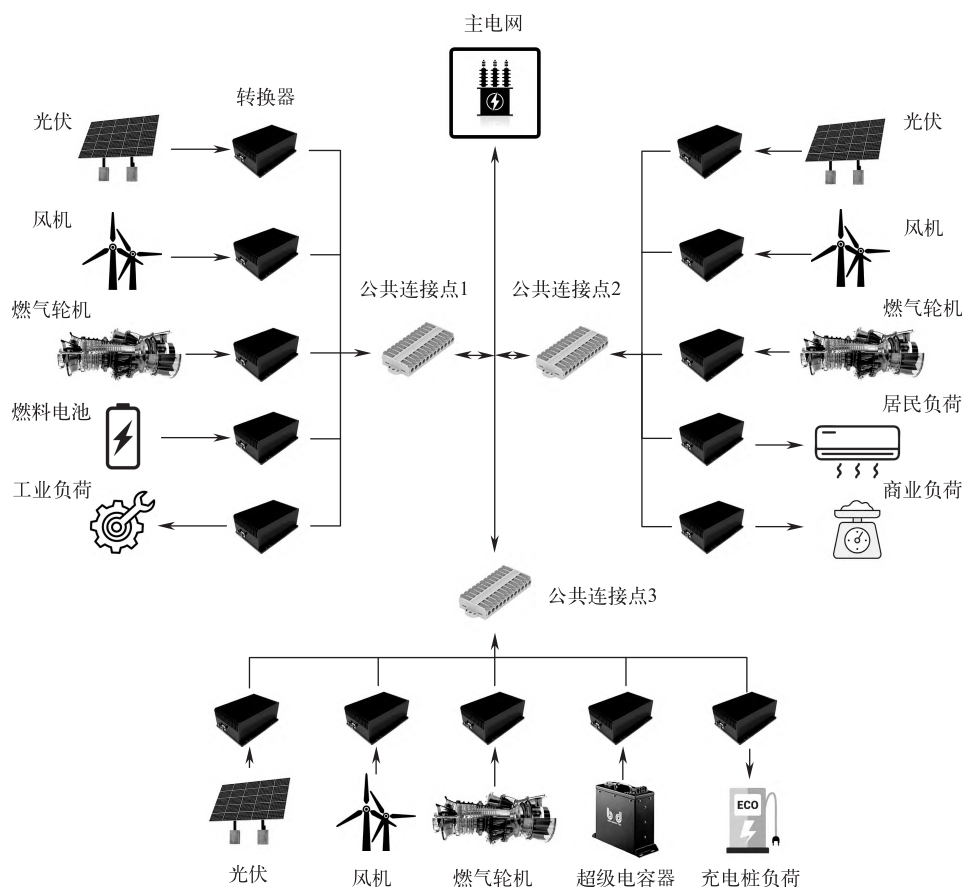


图1 多微电网系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of multi-microgrid system

1.2.1 光伏发电系统

光伏发电系统的输出功率与太阳辐射强度密切相关。光伏阵列 i 的输出功率 P_{pv_i} 可以表示为

$$P_{pv_i} = \eta_{pv_i} G_i A_{pv_i} \quad (1)$$

式中, η_{pv_i} 为光伏阵列 i 的数量; P_{pv_i} 为光伏阵列 i 的转换效率; G_i 为太阳辐射强度; A_{pv_i} 为光伏阵列 i 的有效面积。

1.2.2 风力发电系统

风力发电系统的输出功率主要取决于风速。风力发电机 i 的输出功率 P_{wt_i} 可以表示为^[7]

$$P_{wt_i} = 0.5 \rho A_{wt_i} C_p v_i^3 \quad (2)$$

式中, ρ 为空气密度; A_{wt_i} 为风力发电机 i 的叶片扫过面积; C_p 为风力发电机的功率系数; v_i 为风速。

1.2.3 储能系统

储能系统的状态与充放电过程有关。储能装

置 i 的状态 $SOC_{i(t)}$ 可以表示为^[8]

$$SOC_{i(t)} = SOC_{i(t-1)} + \eta_{ch_i} P_{ch_{i(t)}} \Delta t - \frac{P_{dis_{i(t)}}}{\eta_{dis_i}} \Delta t \quad (3)$$

式中, η_{ch_i} 和 η_{dis_i} 分别为储能装置 i 的充电和放电效率; $P_{ch_{i(t)}}$ 和 $P_{dis_{i(t)}}$ 分别为充电和放电功率; Δt 为时间步长。

1.2.4 传统能源系统

传统能源通常由燃气或柴油发电机组成。燃气发电机 i 的输出功率 P_{tg_i} 可以表示为

$$P_{tg_i} = \eta_{tg_i} F_{fuel_i} \quad (4)$$

式中, η_{tg_i} 为燃气发电机 i 的转换效率; F_{fuel_i} 为燃料消耗率。

1.3 异构网络多目标优化模型

为了实现微电网中各类能源系统的协同和互补, 本文采用一种能源互补性和协同性的度量方法, 以评估和优化各种能源系统之间的

相互作用，并基于此构建了一个多目标优化模型。

1.3.1 能源互补性指标

首先使用能源互补性指数^[9] (Energy Complementarity Index, ECI) 度量微电网中各类能源系统之间的互补性。ECI的计算公式为

$$ECI = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{|P_{i(t)} - P_{j(t)}|}{N(N-1)} \quad (5)$$

式中， N 为能源系统数量； $P_{i(t)}$ 和 $P_{j(t)}$ 分别为第 i 和第 j 个能源系统在时刻 t 的输出功率。

每个能源系统的输出功率范围为

$$P_{i_{\min}} \leq P_{i(t)} \leq P_{i_{\max}} \quad (6)$$

1.3.2 能源协同性指标

使用能源协同性指数^[10] (Synergistic Cooperation Index, SCI) 度量微电网中各类能源系统之间的协同性。SCI的计算公式为

$$SCI = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{|P_{i(t)} P_{j(t)}|}{N(N-1)} \quad (7)$$

简言之，ECI关注不同能源之间的补充关系，确保稳定供电；而SCI关注不同能源如何同步响应需求变化。

1.3.3 多目标优化模型

在以上定义的基础上，本文构建了一个多目标优化模型，目标是最小化ECI和最大化SCI，以实现微电网间的协同和互补。

$$\min ECI \quad (8)$$

$$\max SCI \quad (9)$$

为了解决这个多目标优化问题，本文采用帕累托最优方法^[11]，引入一个权重系数 λ 来调整两个目标的相对重要性，并通过调整 λ 的值找到最优解。

$$\min \lambda \times ECI - (1-\lambda) \times SCI \quad (10)$$

式中， $0 \leq \lambda \leq 1$ 。

2 自适应负荷管理策略

负荷管理是指根据系统需求对负荷进行有效调节，以实现能源系统的高效利用和节能减排。在多微电网系统中，负荷需求通常具有较大的波

动性和不确定性，负荷管理是实现系统调度优化的关键。

为了实现对负荷进行预测和动态调整，本文提出了基于Prophet时间序列模型的自适应负荷管理策略。在负荷管理中，使用Prophet时间序列模型，该模型主要由趋势、季节性和假日效应三部分组成^[12]。不同时间下负荷预测值表示为

$$y(t) = g(t) + s(t) + h(t) + \epsilon t \quad (11)$$

式中， $g(t)$ 代表负荷的总体趋势，通常使用逻辑斯蒂生长模型^[13]或平滑模型表示，即

$$g(t) = \frac{a}{(1 + e^{-k(t-m)})} \quad (12)$$

式中， k 为初始增长率； a 为趋势的饱和点； m 为趋势的转折点。这些参数都是通过历史负荷数据拟合得到的。

$s(t)$ 表示季节性变化，通常可以用傅里叶级数表示为

$$s(t) = \sum_{i=1}^N [\beta_i \cos(2\pi i / P)t + \gamma_i \sin(2\pi i / P)t] \quad (13)$$

式中， N 为傅里叶级数的阶数； β_i 和 γ_i 为待估计的参数； P 为季节性的周期。

$h(t)$ 表示假日效应，可采用以下离散函数表示

$$h(t) = \varphi D(t) \quad (14)$$

式中， φ 为假日效应的强度； $D(t)$ 为一个离散函数，在假日时刻取1，否则取0。

模型参数是通过优化以下目标函数来估计的，即

$$L = \sum_{i=1}^N (y(t) - y'(t))^2 + \lambda \sum_{i=1}^N \text{abs}(a) \quad (15)$$

式中， $\Delta L = y(t) - y'(t)$ 为预测值与真实负荷值之间的残差； λ 为正则化参数。

3 基于异构网络优化与自适应负荷管理的多微电网优化调度模型

3.1 目标函数

为了实现多微电网系统的高效、可靠和经济运行，本文将异构网络优化方法和自适应负荷管理策略结合起来，构建一个多目标优化模

型^[14-15]。

(1) 能源子网间的传输成本

$$J_1 = \sum_{i=1}^{N_{sg}} \sum_{j=1}^{N_{sg}} C_{ij} P_{ij(t)} \quad (16)$$

式中, C_{ij} 为能源子网 i 和子网 j 之间的传输成本; $P_{ij(t)}$ 为能源子网 i 在时刻 t 向子网 j 传输的能量。

(2) 负荷输出功率与需求功率之间的差异

$$J_2 = \sum_{i=1}^{N_{ld}} (P_{out_{i(t)}} - P_{ld_{i(t)}})^2 \quad (17)$$

式中, $P_{out_{i(t)}}$ 为负荷 i 在时刻 t 的输出功率; $P_{ld_{i(t)}}$ 为负荷 i 在时刻 t 的需求功率。

(3) 能源子网发电功率的平滑度

$$J_3 = \sum_{i=1}^{N_{sg}} (P_{sg_{i(t)}} - P_{sg_{i(t-1)}})^2 \quad (18)$$

式中, $P_{sg_{i(t)}}$ 为能源子网 i 在时刻 t 的发电功率。

(4) 碳排放

设光伏发电系统的碳排放系数为 c_{pv} , 风力发电系统的碳排放系数为 c_{wt} , 传统能源系统的碳排放系数为 c_{tg} , 则多微电网系统在时刻 t 的总碳排放可以表示为

$$J_4 = c_{pv} p_{pv}(t) + c_{wt} p_{wt}(t) + c_{tg} p_{tg}(t) \quad (19)$$

式中, $p_{pv}(t)$ 、 $p_{wt}(t)$ 和 $p_{tg}(t)$ 分别为光伏发电系统、风力发电系统和传统能源系统在时刻 t 的输出功率。

(5) 运行安全风险

设光伏发电系统、风力发电系统和传统能源系统的安全风险值分别为 $s_{pv}(t)$ 、 $s_{wt}(t)$ 和 $s_{tg}(t)$, 则多微电网系统在时刻 t 的总运行安全性风险表示为

$$J_5 = s_{pv}(t) + s_{wt}(t) + s_{tg}(t) \quad (20)$$

综上, 多目标优化模型的目标函数为

$$J = a_1 J_1 + a_2 J_2 + a_3 J_3 + a_4 J_4 + a_5 J_5 \quad (21)$$

式中, a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 和 a_5 是权重系数, 用于平衡各目标之间的重要性。在实验仿真中, 这些权重系数可以根据实际需求和优先级进行调整。

3.2 约束条件

在多微电网调度策略模型中, 为了满足

系统调度的要求, 本文综合考虑以下几个约束条件。

(1) 能量平衡约束条件

能量平衡约束条件是指多微电网系统在运行过程中, 能量产生和消耗保持平衡^[16]。能量平衡约束条件可以表示为

$$\sum_{i=1}^{N_{sg}} P_{in_{i(t)}} - \sum_{i=1}^{N_{sg}} P_{out_{i(t)}} - \sum_{i=1}^{N_{ld}} P_{ld_{i(t)}} = 0 \quad (22)$$

式中, $P_{in_{i(t)}}$ 为能源子网 i 在时刻 t 的输入功率量; $P_{out_{i(t)}}$ 为能源子网 i 在时刻 t 的输出功率量; $P_{ld_{i(t)}}$ 为负荷 i 在时刻 t 的需求功率。

(2) 能源转换效率约束条件

$$\eta_{ij(t)} P_{ij(t)} \leq P_{sg_{i(t)}} \quad (23)$$

式中, $\eta_{ij(t)}$ 为能源子网 i 在时刻 t 向能源子网 j 传输能量的转换效率; $P_{ij(t)}$ 为能源子网 i 在时刻 t 向能源子网 j 传输的能量; $P_{sg_{i(t)}}$ 为能源子网 i 在时刻 t 的发电功率。

(3) 能源传输容量约束条件

$$P_{ij(t)} \leq P_{ij_{max}} \quad (24)$$

式中, $P_{ij(t)}$ 为能源子网 i 向能源子网 j 传输能量的最大容量。

(4) 负荷需求响应约束条件

设多微电网系统的负荷需求功率为 $D(t)$ ^[17-18], 则负荷需求响应约束条件可以表示为

$$|D(t) - D(t-1)| \leq R^{max} \quad (25)$$

式中, R^{max} 为系统的最大响应速度。

3.3 算法设计

为了实现基于异构网络优化与自适应负荷管理的多微电网调度策略模型, 本文采用多目标混合蚁群 (Multi-Objective Hybrid Ant Colony Optimization, MOHACO)^[19] 算法。多目标混合蚁群算法结合了蚁群算法的全局搜索能力和局部搜索能力, 能够在搜索过程中同时考虑多个目标。算法的实现采用了基于混合整数线性规划的求解方法, 以实现系统调度的优化, 提高能源利用效率和负荷平衡。算法求解流程设计如图2所示。

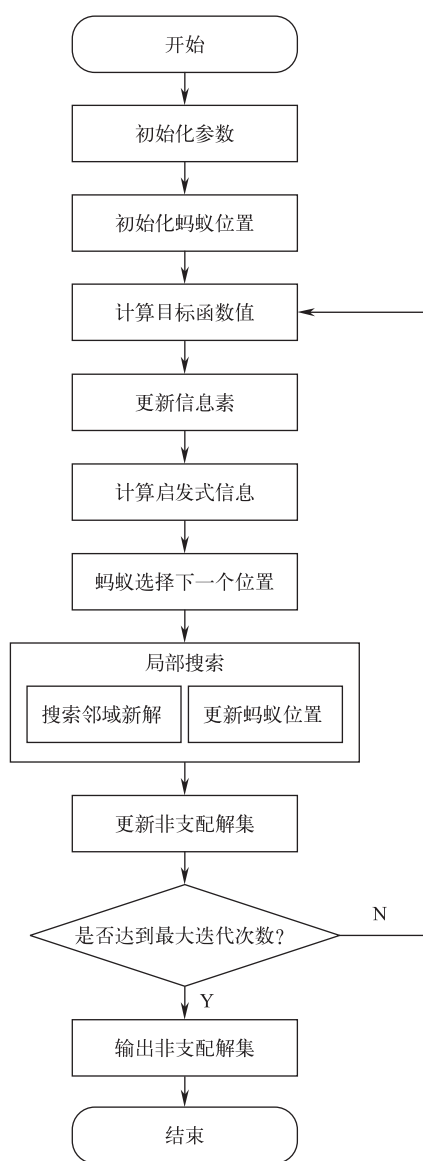


图2 算法求解流程图

Fig. 2 Algorithm solving flowchart

4 算例分析

为了验证本文提出的多微电网调度策略模型的有效性,本文设计了一系列的仿真实验,并对实验结果进行了分析。

4.1 场景描述和基本参数

本文的仿真实验采用MATLAB/Simulink进行建模和仿真,并设计了一个由3个能源子网、4个负荷和2个存储设备(燃料电池和超级电容器)组成的多微电网系统。系统各能源子网的电源配置及参数设定^[20]见表1。

表1 子微电网微电源设置

Tab. 1 Micro-source setup in sub-microgrids

(单位: kW)

子微电网	微电源			
	光伏	风电	燃气轮机	储能
能源子网 1	220	125	150	30
能源子网 2	225	130	150	-
能源子网 3	175	240	220	50

系统各能源子网的负荷配置及参数设定^[21]见表2。

表2 子微电网负荷设置

Tab. 2 Load setup in sub-microgrids

子微网	负荷	负荷类型	负荷需求 / kW	功率因数
能源子网 1	负荷 1	工业负荷	650	0.85
	负荷 2	商业负荷	460	0.9
能源子网 2	负荷 3	居民负荷	550	0.9
	负荷 4	充电桩负荷	380	0.9

为了实现基于异构网络优化与自适应负荷管理的多微电网调度策略模型,本文采用多目标混合蚁群算法求解多目标优化问题。多目标混合蚁群算法的参数设置见表3。

表3 算法参数

Tab. 3 Algorithm parameters

参数名称	符号	数值
蚂蚁数量	M	50
最大迭代次数	$T_{\max}$	100
信息素挥发系数	ρ	0.5
信息素更新常数	Q	100
初始信息素浓度	τ_0	0.1
局部搜索概率	p_{ls}	0.25

4.2 结果分析

4.2.1 目标函数优化结果

通过仿真实验得到目标函数的优化结果,具体见表4。

表4 优化结果

Tab. 4 Optimization results

目标函数	优化前	优化后	提升率 (%)
能源子网间的传输成本	105 元 / 天	85 元 / 天	19.04
负荷输出功率与需求功率间的差异	120 kW	98 kW	18.33
能源子网发电功率的平滑度	0.25	0.18	28.00
碳排放	101 kg / 天	92 kg / 天	8.91
运行安全风险	0.39	0.24	38.46

从表4可以看出,本文提出的多目标优化模型在各方面均取得了较好的优化效果,表明本文提出的异构网络优化方法和自适应负荷管理策略具有较好的实用性和有效性。

4.2.2 异构网络优化结果

本文提出的异构网络优化方法主要目标是降低能源子网间的功率变化(ESI),提高整个系统的稳定性(SCI)。优化前后结果如图3所示。

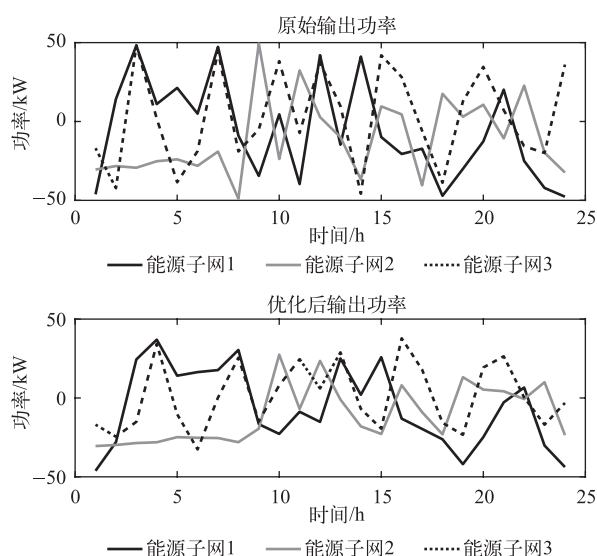


图3 异构网络优化结果

Fig. 3 Optimization result diagram of heterogeneous network

经仿真实验对比可以明显看出,优化后的曲线变化趋势减缓,变化幅度减小,SCI有所提高,而ESI明显降低。这表明优化后的异构网络能源系统能更好地适应环境变化和负荷需求,提高了系统的运行效率和稳定性。因此,本文提出的异构网络优化方法有助于实现多微电网间的协同和互补。

4.2.3 算法性能对比

为了验证所采用的多目标混合蚁群算法的优越性,先后使用本文算法、遗传算法、粒子群优化算法及蚁群算法求解本文多目标优化模型,根据每组优化参数进行了性能对比。各算法的性能指标如图4所示。

从图4可以看出,本文所采用的多目标混合蚁群算法在能源子网间的传输成本、负荷输出功率与需求功率之间的差异、能源子网发电功率的

平滑度、碳排放以及运行安全风险方面均优于其他算法,在各项性能指标上均具有较大优势。

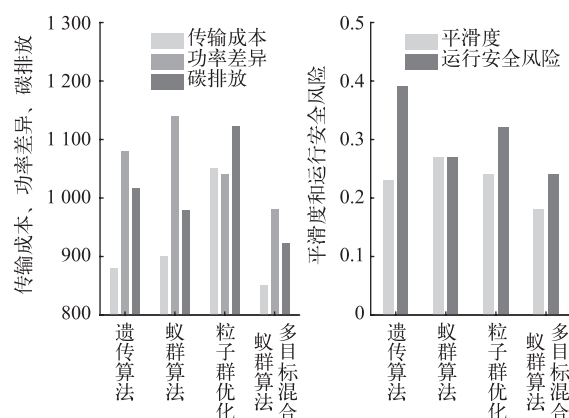


图4 算法性能对比

Fig. 4 Algorithm performance comparison diagram

4.2.4 负荷预测与调度策略对比

负荷管理效果如图5所示。

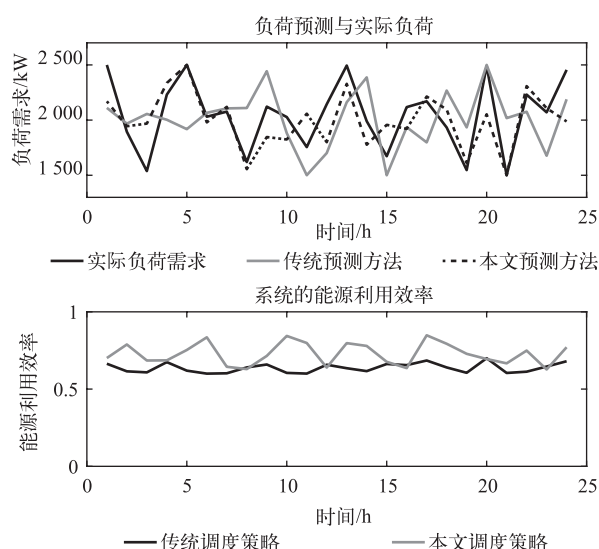


图5 负荷管理效果

Fig. 5 Load management effect diagram

图5中,上部分对比了实际负荷需求与预测负荷的差异。新的预测方法明显减少了与实际需求之间的误差,提高了预测准确度和系统稳定性。下部分展示了能源利用效率的对比。新的调度策略相比传统策略,显著提升了能源利用效率,降低了能源浪费。

总的来说,本文提出的自适应负荷管理策略改善了负荷预测准确性和能源利用率,展现出其

优越性和实用性。

5 结束语

1) 提出了一种针对多微电网中异构网络的优化方法, 实现了不同能源系统的互补与协同。

2) 设计了一种自适应负荷管理策略, 有效应对多微电网负荷的不确定性, 提高了系统调度的稳定性和可靠性。

3) 构建了考虑异构网络优化与自适应负荷管理的多微电网调度策略模型, 并通过仿真实验验证了其有效性。

4) 本文的研究成果对于多微电网的理论研究与实际应用具有一定参考意义, 为多微电网的高效、可靠与经济运行提供了理论支持和实践方法。

参考文献

- [1] 刘迎澍, 陈曦, 李斌, 等. 多微网系统关键技术综述[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3804-3820.
- [2] 张显, 史连军. 中国电力市场未来研究方向及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 1-11.
- [3] 王守相, 吴志佳, 袁霜晨, 等. 区域多微网系统的多目标优化调度方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(5): 14-20.
- [4] 李美成, 梅文明, 张凌康, 等. 基于可再生能源不确定性的多能源微网调度优化模型研究[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1260-1270.
- [5] 徐青山, 李淋, 蔡霖霖, 等. 考虑电能交互的冷热电多微网系统日前优化经济调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 36-44.
- [6] 谢敏, 吉祥, 柯少佳, 等. 基于目标级联分析法的多微网主动配电系统自治优化经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4911-4921, 5210.
- [7] 吕天光, 艾芊, 孙树敏, 等. 含多微网的主动配电系统综合优化运行行为分析与建模[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 122-132.
- [8] 江润洲, 邱晓燕, 李丹, 等. 含储能系统的多微网智能配电系统经济运行[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3596-3602.
- [9] HUI Bao, PAN Shi. Research on energy efficiency optimization in heterogeneous network[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3634: 687-691.
- [10] 陈忠华, 高振宇, 陈嘉敏, 等. 考虑不确定性因素的综合能源系统协同规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 32-40.
- [11] 彭湃, 刘敏. 基于Prophet-LSTM组合模型的短期负荷预测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(11): 15-20.
- [12] 朱江行, 邹晓松, 熊炜, 等. 基于Prophet与XGBoost混合模型的短期负荷预测[J]. 现代电力, 2021, 38(3): 325-331.
- [13] 王迪, 吴鑫强, 王振浩. 基于改进遗传算法的含分布式电源配电网故障定位[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(1): 1-7.
- [14] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 微网多目标经济调度优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 57-66, 85.
- [15] 陈灵敏, 吴杰康, 张文杰, 等. 基于鲁棒优化的微能源网综合需求响应协同调度策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 159-169.
- [16] 崔杨, 郭福音, 仲悟之, 等. 多重不确定性环境下的综合能源系统区间多目标优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2964-2975.
- [17] 滕云, 刘硕, 回茜, 等. 考虑区域多能源系统集群协同优化的联合需求侧响应模型[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7282-7296.
- [18] 吉兴全, 张旋, 于一潇, 等. 考虑综合能源系统运行灵活性的输配协同优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 29-40.
- [19] 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.
- [20] ZHOU Jianzhong, WANG Chao. A multi-objective multi-population ant colony optimization for economic emission dispatch considering power system security[J]. Applied Mathematical

- Modelling, 2017, 45.
- [21] 韩笑, 司强, 俞晨昊, 等. 基于混合整数线性规划的配电网自愈优化方[J]. 智慧电力, 2019, 47(6): 107-112, 126.

作者简介

董硕 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网系统优化调度。

尉鹏程 (1995—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统及其自动化。

郝建锋 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风电场功率预测。

黄久鸿 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车灵活性应用。

(收稿日期: 2023-07-31)