

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)03-0120-05

基于边缘计算的电网云-边协同优化调度方法

张 扬¹, 吴任博¹, 王 佳¹, 隋向阳², 黄文翊²

(1. 广东电网有限责任公司 广州供电局电力调度控制中心, 广东 广州 510000; 2. 东方电子股份有限公司, 山东 烟台 264000)

摘要:为应对大规模分布式电源接入电网带来的运行稳定性挑战与调节灵活性需求,提出基于边缘计算的电网云-边协同优化调度方法。首先,依据云-边协同架构构建了双层协同调度优化模型,上层云端模型以电网整体运行调度成本最小和负荷波动最小为目标,下层边缘端模型则以调度耗时最小、节点及网络调度灵活性最大为目标。然后,针对优化模型,设定了包括公共耦合节点出力、可控分布式电源功率输出、边缘服务器通信及灵活性充裕等约束条件。最后,引入惯性权重机制提升麻雀搜索算法的全局寻优能力,利用改进后的算法求解双层优化模型,以获取全局优化的调度方案。实验结果表明,应用该方法后,电网功率曲线平滑度与节点电压最大偏移度均低于0.02;调度指令响应时间缩短至465 ms以下;各节点功率因数提升至0.9以上;在不同分布式电源规模下,电网运行成本均得到有效降低。这表明该方法能够有效提升电网对分布式能源的消纳能力与调度响应速度。

关键词:边缘计算;云-边协同;优化调度;改进麻雀搜索算法;双层优化调度模型;可再生能源;调度效率;电网协同优化

中图分类号: TP18;TM72

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)03-0120-05

Grid cloud edge collaborative optimal scheduling method based on edge computing

ZHANG Yang¹, WU Renbo¹, WANG Jia¹, SUI Xiangyang², HUANG Wenyi²

(1. Power Dispatching Center of Guangzhou Power Supply Company, Guangdong Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China; 2. Dongfang Electronics Co., Ltd., Yantai 264000, Shandong, China)

Abstract: In order to meet the operation stability challenges and regulation flexibility requirements brought by large-scale distributed generation access to the power grid, this paper proposes a grid cloud edge collaborative optimal scheduling method based on edge computing. Firstly, a dual layer collaborative scheduling optimization model is constructed based on the cloud edge collaborative architecture. The upper layer cloud model aims to minimize the overall operation scheduling cost and load fluctuation of the power grid, while the lower layer edge model aims to minimize scheduling time and maximize node and network scheduling flexibility. Then, for the optimization model, constraints are set including the output of common coupling nodes, controllable distributed power output, edge server communication, and sufficient flexibility. Finally, the inertia weight mechanism is introduced to enhance the global optimization capability of the sparrow search algorithm, and the improved algorithm is used to solve the two-layer optimization model to obtain a globally optimized scheduling scheme. The experimental results show that after applying this method, the smoothness of the power curve of the power grid and the maximum deviation of the node voltage are both below 0.02; The response time for scheduling instructions is shortened to below 465 ms; the power factor of each node is increased to 0.9 or above; Under different scales of distributed power sources, the operating costs of the power grid are effectively reduced. This indicates that the method can effectively improve the power grid's ability to absorb distributed energy and the speed of scheduling response.

Keywords: edge computing; cloud edge collaboration; optimize scheduling; improved sparrow search algorithm; double layer optimization scheduling model; renewable energy; scheduling efficiency; collaborative optimization of power grid

大量分布式电源的接入,使得电网的消纳能力面临较大挑战,线路容量过载情况频繁发生,直接影响电网的供电质量^[1],对于电网的运行安全造成较大影响。

为保证该情况下电网的稳定运行以及电力平衡^[2],需提升电网的灵活调节能力,高效实现对电力系统运行数据的处理、分析和决策,提供更为合理的调度方案,实现多种能源的协同优化调度^[3]。

因此,文献[4]中利用流行的风险测量技术条件风险值对电力系统运行状态进行约束和分析,以提升电力系统的运行经济效益为核心目标,并采用哈里斯霍克优化算法进行求解。但是,该方法未完全考虑到所有潜在的风险因素,难以满足实时调度的要求。文献[5]中在考虑可再生能源出力不确定性的基础上,构建鲁棒优化调度目标模型,通过列与约束生成迭代方法求解后生成训练数据,再

收稿日期:2024-07-08;录用日期:2024-07-27

基金项目:广东电网科技项目(030108GS6220005)

作者简介:张 扬(1989—),男,硕士,研究方向:调度自动化。

引用本文:张 扬, 吴任博, 王 佳, 等. 基于边缘计算的电网云-边协同优化调度方法[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(3): 120-123, 161. (ZHANG Yang, WU Renbo, WANG Jia, et al. Grid cloud edge collaborative optimal scheduling method based on edge computing[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(3): 120-123, 161.)

通过深度学习获取调度策略。但是受可再生能源出力的随机性以及负荷预测误差等因素的影响,该方法调度决策的稳健性不足。文献[6]在构建可再生能源的发电调度模型后,分析区域内的碳夹点,以此确定可再生能源的增量,然后利用寻优算法获取最佳的调度方案。然而在实际应用过程中,碳夹点算法的复杂性较高,导致调度决策难以及时响应系统状态的变化。文献[7]中引入模糊机会约束进行可再生能源的运行约束的转换,再结合可信概念作为调度目标,使调度结果接近理想调度目标,最后利用混合蝙蝠算法进行求解,获取调度方案。但是模糊机会约束规划具有不确定性,导致调度过程中也存在一定的不确定性。

云-边协同是结合云计算和边缘计算的一种技术,云计算平台可以根据电网的实时数据和历史数据,判断电网的运行状态,为电网管控和调度提供可靠依据^[8]。因此,本文为实现电网优化调度,提出基于边缘计算的电网云-边协同优化调度方法,通过该调度方法提高电网的调度效率和运行质量;并且可提升电网自动化管理水平。

1 电网云-边协同优化调度

1.1 协同优化调度的整体架构

本文为实现电网优化调度,提出基于边缘计算的电网云-边协同优化调度方法,该方法整体包含两个部分,分别为云端和边缘端。云端以实现能源的一体化协同调度为核心目标,边缘端则是以保证电网的实时响应以及处理能力,为云端提供支撑。该方法的整体架构如图 1 所示。

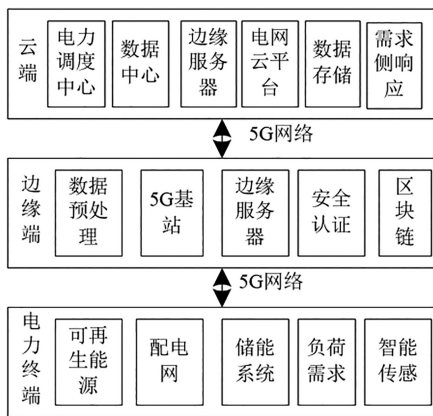


图 1 电网云-边协同优化调度方法整体架构

Fig. 1 Overall architecture of cloud edge collaborative optimization scheduling method for power grid

云端包含电网调度中心、数据中心以及云平台中心,依据边缘端计算的电网运行数据进行整体分析后,实现电网能源一体化协同优化调度,并将调度下发至电网各个执行端^[9-10],并与实现源网荷储的协同互动,全面监测并掌握电网的运行状态。

边缘端的主要目的是为电网协同调度的实时性、高效性提供支撑,其以边缘计算服务器为核心,结合数据处理、5G 技术以及区块链技术,实现海量电网数据的实时传输^[11]、安全存储以及可靠分析。利用边缘计算的强大运

算能力,边缘端可以计算电网各个区域内可再生能源的运营情况,为云端协同调度提供可靠支撑^[12]。

1.2 电网协同调度优化模型构建

电网云-边协同优化调度过程中,依据云端和边缘端协同完成,为充分利用两者的优势和能力,文中设计双层电网协同优化调度模型。

模型采用上下层设计,上层即为云端调度模型,下层即为边缘端协同模型。上层模型以电网整体运行调度成本最小、负荷波动最小为目标函数,下层模型以上层模型的目标为基础,以调度耗时最小、节点调度灵活性最大、网络调度灵活性最大为目标函数,获取边缘设备的最优运行方案。

1.2.1 云端协同优化调度模型

云端优化调度模型以能保证电网整体的安全^[13-14]、稳定以及经济效益为主旨,因此,其目标函数为电网整体运行调度成本最小 $\min \sum_{i=1}^n f_i$ 、负荷波动最小 $\min f_s$, 两个目标函数的计算公式为

$$\min \sum_{i=1}^n f_i = \sum_{i=1}^n [C_i(P_i^{s,i}) + E_i(P_i^{s,i})] \quad (1)$$

$$\min f_s = \sum_{i=1}^T (P_i - \bar{P}_a)^2 \quad (2)$$

式中, n 表示电网中可控制的分布式电源数量; $P_i^{s,i}$ 表示 t 时刻下,第 i 个可控分布式电源的发电功率;该单元的优化目标函数用 f_i 表示; C_i 和 E_i 分别表示分布式电源的发电成本以及其治理成本函数; T 表示整个调度优化周期; P_i 表示用电计划; \bar{P}_a 表示总需求功率的平均值。

1.2.2 边缘端协同优化调度模型

边缘端协同模型是依据云端调度方案为依据,对该端覆盖范围内的电网运行设备以及可再生能源设备进行优化计算,获取最优的运行方案。该模型的目标函数为调度耗时最小 $\min f_1$ 、节点调度灵活性最大 $\min f_2$ 、网络调度灵活性最大 $\min f_3$,其计算公式分别为

$$\min f_1 = \bar{T}_0 \quad (3)$$

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^T [\xi B_i^+ + (1 - \xi) B_i^-] \quad (4)$$

$$\min f_3 = \sum_{i=1}^T \sum_{ij \in M} B_{ij}^i \quad (5)$$

式中,电网中的线路数量用 M 表示; t 时刻下,电网中线路 ij 的传输充裕率用 B_{ij}^i 表示;节点向上或者向下传输时,灵活性充裕率用 B_i^+ 、 B_i^- 表示,其状态变量用 ξ 表示; \bar{T}_0 表示边缘端在进行调度时的传输延时均值。

1.2.3 约束条件

电网在云边协同优化调度时,为保证调度过程中的电网的稳定性,文中针对双层协同优化调度模型设定约束条件。

电网公共耦合节点出力约束。公共耦合节点是电网在运行过程中,用于和上级电网进行功率交换的核心,通过该节点的交换有效处理能源出力波动以及负荷需求变

化时,电网在调度过程中电压和频率的稳定性。则电网公共耦合节点的出力约束公式为

$$P_t^Z = P_t^L - \sum_{i=1}^n P_t^{g,i} \quad (6)$$

式中, P_t^Z 表示公共耦合节点在 t 时刻的交换功率; P_t^L 表示电网 t 时刻的负荷需求量。

可控分布式电源功率输出约束。为保证电网在负荷需求发生突变时依旧能够具备较好的调节能力,依据 P_t^Z 调控分布式电源的输出。令 $P_{t+1}^{g,i}$ 表示 $t+1$ 时刻的发电功率,则可控分布式电源功率输出约束公式为

$$\sum_{i=1}^n P_{t+1}^{g,i} - \sum_{i=1}^n P_t^{g,i} = P_t^Z \quad (7)$$

边缘服务器通信约束。

1) 基站供电量须满足通信需求约束。

$$P_i^{5G} \geq P_o^{5G} \quad (8)$$

式中, P_i^{5G} 表示基站节点的供电功率; P_o^{5G} 表示该节点的用电负荷。

2) 长期传输耗能约束。边缘服务器在进行协同调度过程中,其边缘服务器的传输能耗约束公式为

$$\sum_{t=1}^T E_t^u \leq E_{\max}^u \quad (9)$$

式中, E_t^u 表示长期传输耗能,能耗最大预算为 E_{\max}^u 。

灵活性充裕约束。为了确保电力系统在面临各种不确定性和变化时,能够保持足够的适应性和可靠性,设置网络灵活性约束条件,该约束公式为

$$B_i^+ \geq 0; B_i^- \geq 0; B_i^j \geq 0 \quad (10)$$

1.3 调度模型求解

依据上述小节完成电网协同调度优化模型构建后,为获取优化调度结果,文中采用改进麻雀搜索算法进行目标函数求解,该算法在基础算法的基础上,为提升算法种群的多样性以及全局收敛速度,引入惯性权重机制进行全局寻优能力优化,以此保证最佳的求解效果。

改进麻雀搜索算法在求解过程中,每个解都被视为一个潜在的“食物”,而算法的目标就是找到最优的“食物”,即最优解,从而实现对电网协同调度的优化。基于改进麻雀搜索算法的求解流程如图2所示。

文中采用的改进麻雀搜索算法引入惯性权重机制进行全局寻优能力优化,其主要内容是通过余弦函数 $\cos(\cdot)$ 改变权重的非线性程度,使其扰动程度增加,以此满足电网调度时的随机性和扰动性,其计算公式为

$$\hat{w}(k) = \frac{w_{\max} - w_{\min}}{2} \cos \frac{\pi k}{K} + \frac{w_{\max} - w_{\min}}{2} \quad (11)$$

式中, $\hat{w}(k)$ 表示经过 k 次迭代后优化的权重因子,其最大值和最小值分别用 w_{\max} 和 w_{\min} 表示; K 表示最大迭代次数。

优化后的 $\hat{w}(k)$ 能够更好适应电网调度过程中的非线性、随机性变化,可通过 $\hat{w}(k)$ 进行发现者、追随者以及预警者位置更新,保证其能够更好地适应目标函数的变化,获取最优解。

如果当前个体适应度值用 f 表示,预警者的位置更新公式为

$$x_{ij}^{k+1} = \begin{cases} \hat{x}_{ij}^k + \beta [\hat{w}(k) x_{ij}^k - \hat{x}_{ij}^k], & f_i \neq f_g \\ x_{ij}^k + A \left(\frac{\hat{w}(k) x_{ij}^k - \hat{x}_{ij}^k}{|f_i - f_w| + \varepsilon} \right), & f_i = f_g \end{cases} \quad (12)$$

式中, \hat{x}_{ij}^k 和 x_{ij}^k 表示种群在 j 维空间中的全局最优和最差位置; ε 表示极小数; f_g 和 f_w 表示种群最优和最差适应度值; β 和 A 分别表示正态分布情况下和均匀分布情况下的随机数。

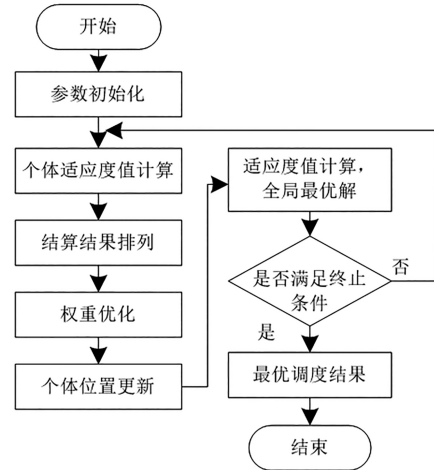


图2 基于改进麻雀搜索算法的求解流程

Fig. 2 Solution process based on improved sparrow search algorithm

通过式(12)实现位置更新,使其在解搜索过程中,不断调整自己的位置,保持与种群的连接,并与其他麻雀共享信息,以此保证整个种群更好地适应搜索环境的变化,提高求解效率和质量。

2 结果分析

为验证文中方法的应用效果,以 IEEE23 网系统作为测试对象,设计如下实验。

该系统中接入分布式光伏、储能系统、柔性负荷,系统的电压等级和基准功率分别为 12 kV 和 10 MVA,接入的光伏和风机容量分别为 800 kW 和 1 200 kW,储能系统的充放电功率上限为 450 kW,该系统的结构如图3所示。该系统的云边协同调度场景详细参数如表1所示。

为验证应用文中方法后的电网优化调度的效果,以功率曲线平滑度 χ_p 和节点电压最大偏移度 ΔV_t 为指标,前者用于衡量电网调度后的功率变化情况,后者用于衡量电网调度后的电能质量,两个指标的取值均在 0~1 之间,其值越小表示功率波动越小,电网的运行安全水平越高,供电质量越好。 χ_p 和 ΔV_t 的计算公式为

$$\chi_p = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(P_t - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_j \right)^2} \quad (13)$$

$$\Delta V_t = \max \left\{ \left| \frac{V_{\max} - V_e}{V_e} \right| \times 100\%, \left| \frac{V_{\min} - V_e}{V_e} \right| \times 100\% \right\} \quad (14)$$

式中, P_j 表示节点 j 的功率; n 表示节点数量; V_e 表示额定电压; V_{max} 和 V_{min} 分别表示电压最大、最小值。

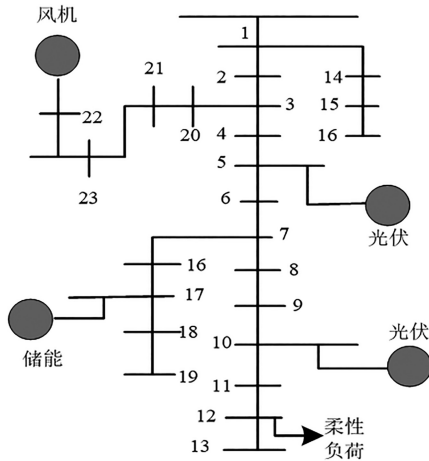


图3 IEEE23网系统结构

Fig. 3 IEEE23 network system architecture

表1 云边协同调度场景详细参数

Tab. 1 Detailed parameters of cloud edge collaborative scheduling scenarios

场景	参数名称	数值
云端	服务器数量/台	1
	计算资源/GHz	6.5, 9.5
	排队时延阈值/s	0.2
	最大配对时延超出阈值概率	0.3
边缘端	计算资源/GHz	4, 6
	排队时延阈值/s	0.2
	最大配对时延超出阈值概率	0.3
	时隙/ms	100
	服务器数量/台	5
	链路带宽/MHz	1

电网中可再生能源渗透率的逐渐增加,采用文中方法进行电网的优化调度,依据上述公式计算调度后电网的 χ_p 和 ΔV_i 结果,如表2所示。

表2 功率曲线平滑度和节点电压最大偏移度测试结果

Tab. 2 Test results of smoothness of power curve and maximum offset of node voltage

可再生能源渗透率/%	功率曲线平滑度	节点电压最大偏移度
3	0.014	0.016
6	0.016	0.015
9	0.013	0.017
12	0.012	0.015
15	0.017	0.016
18	0.015	0.018
21	0.014	0.014
24	0.013	0.019
27	0.018	0.016
30	0.015	0.017

分析表2可知。随着电网中可再生能源渗透率的逐

渐增加,通过文中方法后, χ_p 和 ΔV_i 的结果均在 0.02 以下,其中 χ_p 的最大值为 0.018, ΔV_i 的最大值为 0.019。因此,文中方法具备较好的电网协同优化调度能力,可以充分考虑不确定性因素,满足实时调度的要求。

为验证文中方法的电网优化调度效果,获取文中方法应用前后,电网中各个节点的功率因数结果以及调度响应时间,由于篇幅原因,结果仅随机呈现部分节点的测试结果,如表3所示。

表3 电网中节点功率因数以及调度响应时间

Tab. 3 Nodes power factor and scheduling response time in the power grid

节点	功率因数		调度响应时间/ms	
	应用前	应用后	应用前	应用后
1	0.813	0.911	816	422
2	0.847	0.909	867	441
3	0.822	0.922	885	435
4	0.851	0.947	877	442
5	0.873	0.936	911	405
6	0.881	0.928	967	417
7	0.864	0.907	897	465
8	0.859	0.913	986	429
9	0.873	0.934	954	437
10	0.855	0.928	926	426

分析表3可知。文中方法应用前,电网调度后各个节点的功率因数均低于 0.90,并且调度指令响应时间均在 800 ms 以上,最大响应时间为 986 ms;文中方法应用后,各个节点调度后的功率因数均在 0.9 以上,并且调度指令响应时间均在 465 ms 以下。因此,文中方法具备更佳的电网调度能力,能够更好地保证电网运行安全。

为进一步验证文中方法的调度效果,以电网运行成本为测试内容,获取在不同分布式电源数量下,调度前后的电网的运行成本,测试结果如图4所示。

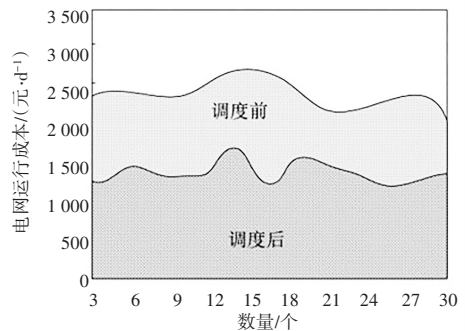


图4 调度前后的电网的运行成本

Fig. 4 The operating costs of the power grid before and after scheduling

分析图4可知。采用文中方法进行电网优化调度后,可明显减少电网的运行成本,因为文中方法在进行电网优化调度时,采用上下双层调度模型设计,可结合电网的实时变化实现电网优化调度。

(下转第161页)