

doi: 10.7690/bgzd.2025.10.014

新能源接入下区域电力系统负荷分散调度方法

吴文静¹, 张晋华²

(1. 商丘工学院信息与电子工程学院, 河南 商丘 476000; 2. 华北水利水电大学电力学院, 郑州 450045)

摘要: 为有效提升负荷分散调度精度, 提出新能源接入下区域电力系统负荷分散调度方法。采集新能源接入时的电力系统运行状态数据, 并对采集数据实施去噪处理, 提升系统运行状态数据质量; 根据数据去噪结果, 建立适用于新能源接入下区域电力系统分散调度目标函数以及约束条件, 完成区域电力系统负荷分散调度模型构建; 使用改进后的遗传算法对模型展开求解, 根据求解结果确定区域电力系统分散调度最佳解, 实现新能源接入下区域电力系统分散调度。实验结果表明: 使用该方法开展区域电力系统分散调度时, 调度效果好且性能高。

关键词: 新能源接入; 区域电力系统; 负荷分散调度; 分散调度模型

中图分类号: TP301.6; TM933 **文献标志码:** A

Load Decentralized Dispatching Method of Regional Power System Under New Energy Access

Wu Wenjing¹, Zhang Jinhua²

(1. School of Information and Electronic Engineering, Shangqiu Institute of Technology, Shangqiu 476000, China;

2. School of Power, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: In order to effectively improve the accuracy of load decentralized dispatching, a load decentralized dispatching method of regional power system under new energy access is proposed. Collect the operation state data of the power system when the new energy is connected, and denoise the collected data to improve the quality of the system operation state data; according to the results of data denoising, the objective function and constraint conditions of decentralized dispatching of regional power system suitable for new energy access are established, and the construction of load decentralized dispatching model of regional power system is completed. The improved genetic algorithm is used to solve the model, and the optimal solution of decentralized dispatching of regional power system is determined according to the solution results, so as to realize the decentralized dispatching of regional power system under the access of new energy. The experimental results show that when this method is used to carry out decentralized dispatching of regional power system, the dispatching effect is good and the performance is high.

Keywords: new energy access; regional power system; load decentralized dispatch; decentralized dispatch model

0 引言

巨型电站的建设以及远距离输电技术的发展, 形成我国以巨型电站为中心的大型多区域互联的电力系统供电模式。近年来, 随着电力市场改革进程的推进以及环境、能源问题的日益突出, 可再生能源发电技术自此走入大众视野, 并得到迅速发展。截至 2020 年, 我国可再生能源发电总装机已经达到 60%。风电能源发电并网过程中, 由于自身较强的不确定特征, 会给电力系统运行带来严峻挑战。与此同时, 能源互联网的发展使我国电力系统^[1-2]呈现多区互联运行模式, 多区域互联网框架下风电新能源消纳问题, 成为能源发电行业重点关注问题。区域电力系统运行过程中, 新能源并网过程中, 会给区域电力系统带来巨大的负荷压力, 严重情况下

会直接造成电力系统故障, 带来较大经济损失。针对上述问题分析结果, 对新能源电网接入下区域电力系统实施有效的分散调度, 成为电力行业亟待解决的问题。

张斌等^[3]根据电力系统特性建立了电力系统电压敏感型负荷模型, 使用电压-功率关系对用电行为展开行为分析; 根据分析结果, 引入灵敏度分析算法对电力系统负荷功率可调范围实施精准评估; 将负荷功率作为调节裕度, 制定与之适应的调度策略; 通过设计的调度策略完成电力系统的负荷分散调度。关燕鹏等^[4]基于电力系统惯量缩减、调频困难问题, 提出一种基于虚拟惯量的电力负荷调度控制算法。该方法设计一种具备控制器稀疏互联结构约束的负荷频率控制系统数学模型; 使用

收稿日期: 2024-10-06; 修回日期: 2024-11-12

基金项目: 河南省自然科学基金项目(202300410271)

第一作者: 吴文静(1990—), 女, 河南人, 硕士。

Lyapunov-Krasovskii 方法对模型展开辨识, 根据线性矩阵不等式设计并模型对应的负荷分散调度控制器; 根据设计的控制器完成电力系统负荷的分散调度。李德鑫等^[5]根据电力系统特性使用目标级联算法完成区域电力系统负荷调度模型的建立; 将模型分成上下 2 个层级, 对模型展开参数优化; 根据优化的模型完成电力系统负荷的精准调度。

上述方法在开展区域电力系统负荷分散调度前, 由于未能及时采集电力系统状态数据, 并对数据实施去噪处理, 提升数据质量, 导致上述方法在区域电力系统负荷分散调度时, 调度效果差。为解决上述区域电力系统负荷分散调度过程中存在的问题, 提出新能源接入下区域电力系统负荷分散调度方法。

1 电力系统状态数据处理

开展新能源接入^[6-7]电力系统负荷分散调度前, 需要采集新能源接入下的电力系统运行状态数据, 并对数据实施去噪处理, 提升数据质量, 为后续建立区域电力系统负荷分散调度模型做好基础准备工作。

使用 2 维小波阈值方法^[8-9]开展电力系统状态数据去噪前, 需要对新能源接入下的区域电力系统展开运行数据采集, 完成采集后将采集数据整合建立电力系统运行状态数据集, 并依据 2 维的小波阈值去噪方法完成电力系统的运行数据去噪, 提升电力系统的运行状态数据质量。

1.1 确定阈值

阈值选取能够直接决定数据的去噪效果, 所以选取合适阈值是小波阈值去噪中的核心环节。电力系统运行状态数据开展小波去噪时, 通过固定阈值门限准则中 VisuShrink 算法完成小波阈值的确定, 过程中设定电力系统运行数据的噪声标准差为 ε , 数据的阈值门限获取结果如下式:

$$T = \varepsilon \sqrt{2 \log_2 N}。 \quad (1)$$

式中: N 为电力系统运行数据的信号尺寸; T 为数据的阈值门限。

1.2 建立阈值函数

根据确定的数据噪声阈值, 建立用于电力系统运行状态数据的去噪阈值函数。函数建立过程中通过硬阈值、软阈值函数准则, 完成阈值函数的建立, 结果如下式:

$$\hat{\omega}_{j,k}^y = \begin{cases} \omega_{j,k}, & |\omega_{j,k}| \geq T \\ 0, & |\omega_{j,k}| < T \end{cases} \quad (2)$$

$$\hat{\omega}_{j,k}^r = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_{j,k})(|\omega_{j,k}| - T), & |\omega_{j,k}| \geq T \\ 0, & |\omega_{j,k}| < T \end{cases}$$

式中: $\hat{\omega}_{j,k}^y$ 为硬阈值函数; $\hat{\omega}_{j,k}^r$ 为软阈值函数; $\text{sgn}(\bullet)$ 为符号函数。

根据上述硬阈值、软阈值函数开展数据去噪时, 硬阈值函数 $\hat{\omega}_{j,k}^y$ 在 T 位置存在不连续状态, 所以该阈值函数完成去噪后重构的数据信号会存在振荡情况, 而软阈值函数去噪后重构数据信号虽然连续, 但是数据去噪的效果较差。根据上述硬阈值函数以及软阈值函数的缺点, 重新对阈值函数实施改进, 建立一种新的阈值函数用于电力系统状态数据的去噪, 阈值函数表述形式如下式:

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} (1 - \delta)\omega_{j,k} + \delta \text{sgn}(\omega_{j,k})(|\omega_{j,k}| - T), & |\omega_{j,k}| \geq T \\ 0, & |\omega_{j,k}| < T \end{cases}。 \quad (3)$$

式中 δ 为加权因子。

1.3 去噪流程

电力系统运行状态数据具体去噪^[10-11]流程如下:

- 1) 将采集的电力状态运行数据集合作为数据样本, 对其开展数据归一化处理, 形成 2 维的灰度图像矩阵。
- 2) 对运行数据产生 2 维图像实施小波分析, 获取一组小波系数。
- 3) 对分解后小波系数实施阈值处理, 完成小波估计系数的确定。
- 4) 使用 2 维小波对图像信号实施重构, 并对重构信号实施反归一化, 完成去噪后电力系统运行数据的获取。

2 电力系统负荷分散调度方法

根据电力系统运行状态数据去噪结果, 建立新能源接入下区域电力系统负荷分散调度模型。

2.1 建立分散调度模型

2.1.1 建立目标函数

建立新能源接入下区域电力系统负荷分散调度模型, 根据采集的电力系统运行数据, 将一天 24 h 划分成 24 个时间段, 将新能源接入的功率负荷最小

化作为调度目标，建立负荷功率调度的调度目标函数，函数表述形式如下式：

$$\min \sum_{g \in NG} \tilde{\omega}_{j,k} \left\{ A_{Gg}^0(Q_{Gg}^0) + A_{Gg}^R(\Delta Q_{Gg}^{up}, \Delta Q_{Gg}^{dn}) \right\} + \sum_{k \in NW} A_{Wk}^a(\Delta Q_{Wk}^a) + \sum_{j \in ND} A_{Dj}^a(\Delta Q_{Dj}^a) \quad (4)$$

式中：NG 为新能源接入下电力系统中常规发电机组集合；NW 为风电场集合；ND 为电力系统负荷集合； $A_{Gg}^0(Q_{Gg}^0)$ 为系统中风电机组 g 的发电成本特性函数； A_{Gg}^R 为输出功率负荷基点； $A_{Wk}^a(\Delta Q_{Wk}^a)$ 为备用函数； ΔQ_{Gg}^{up} 、 ΔQ_{Gg}^{dn} 为系统中机组的上、下调节负荷容量； $A_{Wk}^a(\Delta Q_{Wk}^a)$ 为新能源接入时的弃风成本函数； ΔQ_{Wk}^a 为实际弃风量； ΔQ_{Dj}^a 为系统负荷的切负荷量； g 、 k 、 j 为常数。

2.1.2 建立约束条件

由于新能源接入下区域电力系统负荷分散调度时，模型影响因素较为繁杂，所以需要对该模型实施相关约束。

1) 节点功率平衡约束。

电力系统负荷分散调度时，需要将系统的接入功率满足平衡约束，条件如下式：

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j \in ND(i)} \tilde{Q}_{Dj} &= \sum_{g \in NG(i)} \tilde{Q}_{Gg} + \sum_{l \in NW(i)} \tilde{Q}_{Ak} + \sum_{l \in NE(i)} \tilde{Q}_{l,ji} - \sum_{l \in NS(i)} \tilde{Q}_{l,ji} \\ \sum_{j \in ND(i)} \tilde{P}_{Dj} &= \sum_{g \in NG(i)} \tilde{P}_{Gg} + \sum_{k \in NA(i)} \tilde{P}_{Ak} + \sum_{l \in NE(i)} \tilde{P}_{l,ji} - \sum_{l \in NS(i)} \tilde{P}_{l,ji} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中：NG(i)、NW(i)、NA(i)、ND(i) 为电力系统节点 i 的机组、新能源、无功补偿以及负荷功率集合；NS(i)、NE(i) 为该电力系统的节点首端、末端支路集合； $\tilde{Q}_{l,ji}$ 、 $\tilde{P}_{l,ji}$ 为支路 l 上的两端有功功率、无功功率。

2) 支路最大允许传输负荷约束。

负荷分散调度时，调度过程中支路允许的负荷载荷条件如下式：

$$\left. \begin{aligned} \tilde{P}_{l,ji}^1 + \tilde{Q}_{l,ji}^1 &\leq Z_l^1 \\ \tilde{P}_{l,ji}^2 + \tilde{Q}_{l,ji}^2 &\leq Z_l^2 \end{aligned} \right\}; \quad \forall l \in NL \quad (6)$$

式中： Z_l 为支路负荷视在功率；NL 为系统支路集合。

2.1.3 建立模型

根据上述建立的目标函数以及约束条件，结合电力系统状态数据，建立用于电力系统负荷分散调度的调度模型^[12-13]，模型表述形式如下式：

$$\lambda_{\max} = f(x) * (\varphi_{ij} [X_i / m]) \text{ s.t. } \left(\frac{\tilde{P}_{l,ji} + \tilde{Q}_{l,ji}}{\sum_{j \in ND(i)} \tilde{Q}_{Dj}} \right) \omega + b \quad (7)$$

式中： $\lambda_{\max}$ 为建立的负荷分散调度模型； $f(x)$ 为目标函数； φ_{ij} 为调度系数； ω 为模型权重； b 为偏置项。

2.2 模型求解

完成负荷分散调度模型建立后，借鉴免疫算法^[14-15]，提出一种具备克隆净化算子的遗传算法，对模型展开求解，获取负荷调度最优解，完成新能源接入下区域电力系统负荷的精准分散调度。具体模型求解流程如下：

1) 针对建立的负荷分散调度模型，使用改进后的遗传算法，生成模型种群，并对种群实施初始化处理。

2) 对种群中个体位置以及移动速度展开计算，以此建立种群个体适应度函数，完成种群个体适应度的获取。

3) 对适应度结果展开排序处理，选取其中排序前 y 个值实施克隆处理，并根据克隆结果 $X_{\text{clo},i}$ 开展种群变异，结果如下式：

$$U_i = \lambda_{\max} X_{\text{clo},i} + \zeta_i \text{rand} X_{\text{imp}}^{\max} \quad (8)$$

式中： U_i 为变异后的种群； $\text{rand} X_{\text{imp}}^{\max}$ 为随机矩阵；

ζ_i 为变异概率。

4) 完成种群变异处理后，根据变异结果将种群随机划分成若干小组，实施交叉计算，并依据计算结果完成种群选择，过程如下式：

$$K_i = U_{i,1} - U_{i,2} + U_{i,3} - U_{i,4} \quad (9)$$

式中 K_i 为交叉计算结果。

5) 根据上述种群交叉选取结果，重新建立种群适应度函数，寻找种群的最佳解（及电力系统负荷分散最佳调度值），完成模型求解。

3 实验研究

为了验证上述新能源接入下区域电力系统负荷分散调度方法的整体有效性，需要对此方法测试。测试过程中，选取某地智能电网中的某区域电力系统作为研究对象，使用所提方法、计及多类型可调度柔性负荷响应的电力系统经济调度策略（文献[3]方法）以及含可再生能源的多区域电力系统负荷频率控制（文献[4]方法）对其实施新能源接入下的电力系统负荷分散调度。通过对调度过程中不同方法的新能源接入负荷波动值、分散调度时间以及实际的

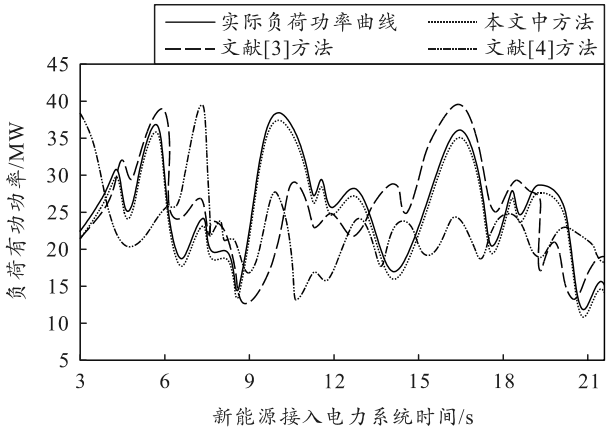
调度效果测试结果, 获取不同方法在区域电力系统负荷分散调度时的实际调度性能。表 1 为具体的实验参数。

表 1 实验参数设置

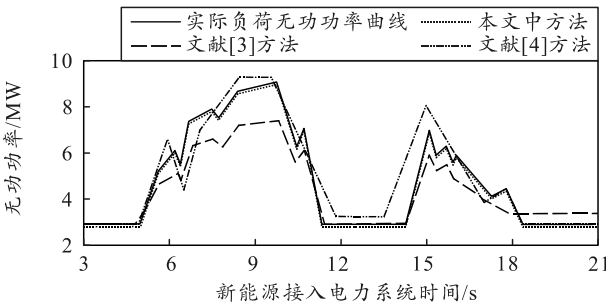
参数	数值
区域电力系统总负荷/MW	1 000
新能源(风能和太阳能)容量/MW	200
区域负荷分布/MW	400; 300; 300
电力系统传输线路容量/MW	500; 300; 400
电力系统传输线路损耗/%	5; 3; 5

1) 新能源接入区域电力系统负荷功率测试。

使用本文中所提方法、文献[3]方法以及文献[4]方法开展新能源接入下的电力系统负荷分散调度过程中, 对不同方法在分散调度时测试出的新能源接入电力产生的负荷功率波动值展开测试, 测试结果如图 1 所示。



(a) 新能源接入下有功率率负荷变化状态测试结果



(b) 新能源接入下无功功率负荷变化状态测试结果

图 1 新能源接入区域电力系统负荷功率测试结果

开展新能源接入下的电力系统负荷分散调度过程中, 若测试出的新能源接入下负荷功率值若与实际负荷功率值之间存在较大偏差, 会直接缩减后续负荷的分散调度精度。分析图 1 可知: 新能源接入下区域电力系统负荷分散调度负荷测试过程中, 本文中方法能够有效地检测出电力系统在新能源接入过程的负荷有功无功功率; 而文献[3]方法以及文献[4]方法测试出电力系统在新能源接入过程的负荷

有功无功功率与实际系统负荷功率之间存在的偏差较大。由此可证明, 所提方法在新能源接入下区域电力系统负荷分散调度时, 具备有效性。

2) 调度执行时间测试。

使用本文中方法、文献[3]方法以及文献[4]方法开展新能源接入下的电力系统负荷分散调度过程中, 对不同方法在分散调度时测试出的分散调度时间展开测试, 测试结果如表 2 所示。

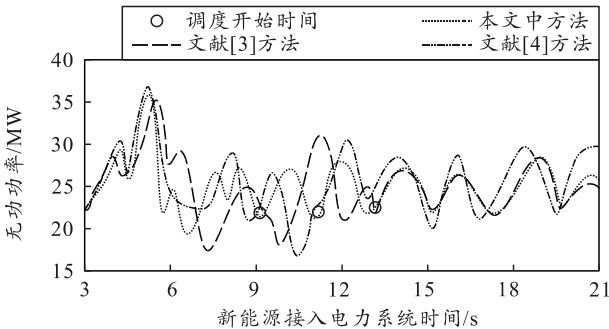
表 2 不同负荷分散调度方法的执行时间测试结果

待调度系统功率负荷值/MW	执行时间测试结果/ms		
	本文中方法	文献[3]方法	文献[4]方法
5	10	12	13
10	13	15	16
15	15	17	18
20	22	25	27
25	25	29	31
30	31	35	38
35	38	41	43
40	50	53	55
45	61	66	69
50	75	79	81

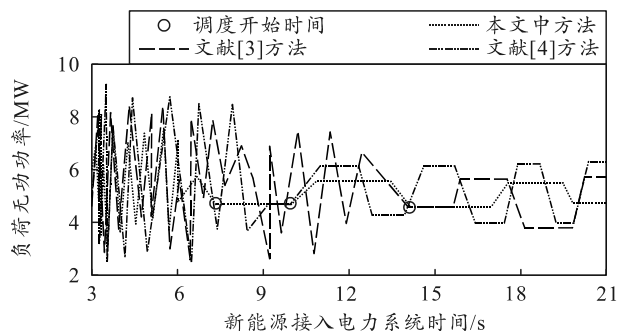
分析表 2 可知: 开展新能源接入下的电力系统负荷分散调度时, 随着待分散调度的负荷功率值越高, 检测出的分散调度执行时间就越长。其中, 文献[3]方法通过灵敏度分析算法对电力系统负荷功率可调范围实施精准评估时存在较大误差, 所以该方法在电力系统负荷分散调度时, 调度时间略高于所提方法测试结果; 文献[4]方法由于在使用根据线性矩阵不等式设计分散调度模型对应的负荷分散调度控制器时, 控制器存在问题, 所以该方法在电力系统负荷分散调度时, 测试出调度执行时间不理想; 而本文中所提方法由于在设计分散调度模型时, 对支路最大允许传输载荷实施了相应约束, 所以该方法在电力系统负荷分散调度时, 调度执行时间短。

3) 实际调度效果测试。

使用本文中方法、文献[3]方法以及文献[4]方法开展新能源接入下的电力系统负荷分散调度过程中, 对不同方法在分散调度时实际分散调度效果展开测试, 测试结果如图 2 所示。



(a) 完成调度后有功率率负荷变化状态测试结果



(b) 完成调度后无功功率负荷变化状态测试结果

图 2 区域电力系统分散调度效果测试结果

分析图 2 可知：新能源接入下的电力系统负荷分散调度时，本文中方法能够在短时间内将新能源接入下的电力系统负荷功率稳定在平稳变化状态，而其他 2 种方法测试出的负荷分散调度效果都低于所提方法的调度效果。由此可知，利用本文中方法在新能源接入下的电力系统负荷分散调度效果好，性能高。

4 结束语

新能源接入时，区域电力系统的负荷都迅速增大并剧烈波动，为有效保障电力系统安全运行，提出新能源接入下区域电力系统负荷分散调度方法。实验结果表明：该方法具有调度效果好、性能高的特点。由于在建立模型约束条件时还存在一定缺陷，今后会针对该项缺陷继续优化该调度方法。

参考文献：

[1] 王健. 配网自动化技术在电力系统中的应用[J]. 自动化应用, 2023, 64(10): 56-58, 61.
 [2] 吴玲瑶, 潘聿文. 智能技术在电力系统自动化中的应用[J]. 集成电路应用, 2023, 40(5): 352-353.
 [3] 张斌, 司大军, 李文云, 等. 计及多类型可调度柔性负荷响应的电力系统经济调度策略[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(4): 39-47.

[4] 关燕鹏, 李晓宁, 贾新春. 含可再生能源的多区域电力系统负荷频率控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(7): 64-71.
 [5] 李德鑫, 宗崇林, 黄大为, 等. 大规模风电汇聚外送的区域送端电力系统两级优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 35-44.
 [6] 董新伟, 裴晨晨, 邓薇, 等. 含新能源接入的配电网中分布式储能系统控制策略[J]. 电力建设, 2021, 42(5): 81-89.
 [7] 马喜平, 贾嵘, 梁琛, 等. 高比例新能源接入下电力系统降损研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4305-4315.
 [8] 索奎, 吕晓春, 张贵宾, 等. 基于二维小波能量阈值的重磁数据去噪算法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(5): 36-45.
 [9] 李启月, 王宏伟, 王靖博, 等. 基于 EEMD 和小波阈值的爆破振动信号预处理研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(3): 28-31, 36.
 [10] 金成浩, 荣莉莉. 考虑区域特征的跨区域电力系统空间复杂网络模型构建[J]. 科技管理研究, 2021, 41(20): 204-215.
 [11] 郭强, 薛志伟, 芦晓辉, 等. 含风光水火储的多区域互联电力系统协同优化负荷频率控制[J]. 热力发电, 2023, 52(3): 136-143.
 [12] 方保民, 李延和, 曲立楠, 等. 考虑风电及可中断负荷一次调频能力的日前调度模型[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(4): 242-250.
 [13] 贺庆, 常大伟, 张俊礼, 等. 天然气冷热电联产系统区间负荷调度策略优化[J]. 动力工程学报, 2022, 42(4): 365-371.
 [14] 胡亚慧, 朱思峰. 智慧社区边缘计算场景下基于免疫算法的卸载决策优化[J]. 天津城建大学学报, 2023, 29(3): 217-223.
 [15] 卢彬炜, 闫光辉, 罗浩, 等. 基于多粒子随机游走免疫算法[J]. 武汉大学学报(理学版), 2022, 68(3): 289-296.