

兼容需求侧资源的交直流配电网分布式调度方法

邵斌 杨光

(国网浙江省电力有限公司杭州市临安区供电公司)

摘要: 交直流配电网存在着多种不确定性因素,如天气变化、负荷波动、设备故障等。这些因素给调度决策带来难度,需要通过合适的建模和优化方法来考虑和应对不确定性,以提高系统的稳定性和可靠性。为此,提出一种兼容需求侧资源的交直流配电网分布式调度方法。搭建资源分布式检索模型,应用查询扩展和分类方法,完成电力需求侧资源分布式检索。引入混沌优化策略,改进粒子群算法,利用该算法实现交直流配电网负荷分布式调度。实验结果表明,研究方法对交直流配电网完成调度后,其风力发电的弃风值显著降低,检索出交直流配电网的负荷数据更准确。并且,改进后的粒子群算法能够在更少的迭代次数中实现目标函数的最小化。

关键词: 需求侧资源检索; 交直流配电网; 分布式调度; 改进粒子群算法

0 引言

随着能源需求的不断增长,传统的集中式电力系统面临着挑战。由于分布式能源资源的不断发展和普及,分布式发电系统逐渐成为一种重要的供电方式^[1]。而交直流配电网作为分布式发电系统的核心组成部分之一,其具有可靠性高、灵活性强、能源利用率较高等优势。因此,研究交直流配电网分布式调度成为当下的一个热点问题^[2]。该研究旨在通过优化分布式发电单元的协同运行,合理调度电力供应,提高系统供电可靠性、降低能耗损失,并实现对电力系统的智能管理和控制^[3]。这项研究将为提高能源利用效率、推动清洁能源发展以及构建可持续发展的电力系统等方面提供重要理论支撑和技术指导。

针对配电网的调度问题,现阶段该领域的专业也

得到了一些较好的研究成果。文献[4]提出了协调柔性负荷与储能的交直流配电网经济优化调度方法,从低压台区负荷的经济角度入手,以调度其分布式电源方式使其负荷成本最小,达到柔性负荷优化目的。但是该方法仅考虑了负荷成本,导致其应用范围不够广泛。文献[5]提出了基于多模式柔性互联的交直流低压配电网优化调度模型。但是多模式柔性互联在配电网调度中的应用弊端容易导致系统复杂性增加。由于多模式柔性互联需要考虑不同设备和系统的匹配性、兼容性以及各种变电站和负荷之间的互联机制,这使得系统设计和调度过程更为复杂,可能导致增加计算和管理的难度,并增加系统运行的风险。因此,在采用多模式柔性互联技术时需要仔细权衡复杂性带来的潜在问题。

针对以上问题，本文设计了新的兼容需求侧资源的交直流配电网分布式调度方法。兼容需求侧资源的交直流配电网分布式调度方法的优势之一是能够充分利用分布式能源和灵活负荷来实现能源供需的平衡。通过将需求侧资源（如储能系统、电动车充电桩等）纳入调度框架，可以更好地调节供电和负荷之间的差异，提高系统的灵活性和可控性。这种方法可以减少对传统电网的依赖程度，并为清洁能源的大规模集成提供支持。同时，兼容需求侧资源的分布式调度方法还能提高电力系统的能源效率，降低能耗损失，以及改善系统的供电可靠性和稳定性。

1 电力需求侧资源分布式检索模型

在实现交直流配电网分布式调度之前，需要先对电力需求侧资源完成分布式检索。随着分布式能源的快速发展，如太阳能光伏和风能等，传统的集中式电力系统面临着诸多挑战。分布式能源的接入使得电力系统的负荷分布变得更加分散，需要更灵活的调度和管理。电力需求侧资源的分布式检索能够促进电力系统的高效运行。通过在需求侧引入分布式能源，可以降低传输损耗，并增强系统的鲁棒性和可靠性。分布式检索技术可以帮助系统运营商实时获取到分布式资源的状态和能量信息，从而合理调度电力供需，优化功率分配并提高整体系统效率。此外，电力需求侧资源的分布式检索还可以提高能源利用率和减少对传统能源的依赖。通过合理开发和调度分布式能源，可以实现对可再生能源的最大利用，减少对化石燃料的消耗，降低温室气体排放，推进可持续发展。电力需求侧资源分布式检索模型总共分成五个模块，分别是需求侧数据采集模块、资源池建模模块、分布式资源检索算法模块、资源状态监测与协调模块、结果评估与优化模块。

具体结构如图 1 所示。

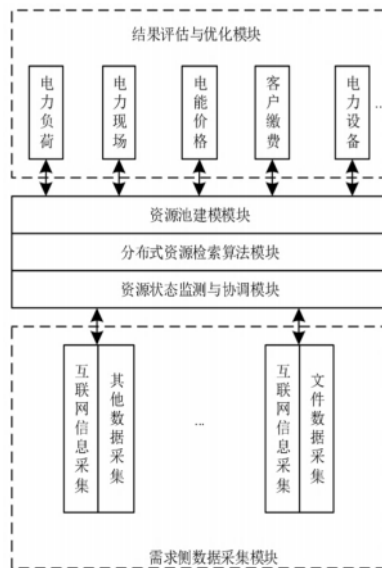


图 1 电力需求侧资源分布式检索模型

需求侧数据采集模块：该模块负责收集和获取与电力需求有关的数据。例如，需求侧负荷数据、用户消费行为数据和特定时间段的能源需求预测等。通过采集这些数据，可以了解需求侧的电力需求和消耗情况。

资源池建模模块：该模块根据需求侧的电力资源类型和特征，对资源池进行建模。资源可以包括分布式发电设备、储能系统以及其他可调节负荷设备。通过建模，可以描述和表示每个资源的技术特性、容量、响应能力和约束条件等信息。

分布式资源检索算法模块：该模块的目标是根据需求和条件，从资源池中选择合适的分布式资源来满足电力需求。检索算法通常基于优化方法，考虑多个因素如成本、能源供应、负荷均衡、可靠性等。它会考虑不同资源之间的互补关系，并根据实时需求和实际情况制定最优的资源调度策略。

资源状态监测与协调模块：该模块负责监测和协调分布式资源的状态和行为。它会收集分布式资源的实时数据、运行状态以及可用容量等信息，并进行监测和评估。当资源被选中并调度之后，该模块还会负责协调资源之间的交互，确保资源的有效利用和协

调运行。

结果评估与优化模块：在此模块中，对所选分布式资源的调度结果进行评估和优化。通过监测实际发电量、节约成本、负荷均衡和供需平衡等指标，评估模型的性能和效果。如果需要，可以通过优化算法对已发布的调度方案进行优化，以进一步提高资源利用率和系统效率。

为了让客户查询的电力需求侧资源和检索结果最接近，在模型的检索模块采用查询扩展和分类相结合的信息检索算法。查询扩展基于相关性的假设，即与客户查询相似的查询应该返回与实际需求侧资源相关的结果。通过根据已知的资源和查询历史构建语义关联网络，可以利用网络中的节点和边来实现查询扩展。基于语义相似度或相关性计算，将查询的特征向量进行扩展。例如，使用同义词、近义词、词语关联等来扩展查询的表示，从而获取更多可能与用户实际需求相关的电力资源。查询扩展是为了解决客户查询的方式可能与实际需求侧资源的描述方式存在差异的问题。通过在客户查询中添加相似、相关或近义词的术语，可以扩展查询的范围，使得更多与查询主题相关的资源被考虑。这样有助于发现更多符合客户实际需求的电力资源。

分类基于文本分类和机器学习的原理，通过训练数据集和标记资源的类别信息，构建分类模型。然后，根据该模型的预测结果，将客户查询和需求侧资源分别归类到相应的类别中。在检索过程中，在特定类别上进行匹配和过滤，以获得更精准的检索结果。分类是为了更加准确地匹配客户查询与实际需求侧资源之间的关系。通过将查询和资源分别归类到特定的类别或标签中，可以在检索过程中针对特定类别进行更加精细化的匹配和筛选。这有助于提高检索结果的准确性和相关性。

应用查询扩展和分类的检索算法步骤如下：

1) 在首次查询时，首先将已知的停止词语筛选出来，构成一个原始的查询矢量，然后利用矢量空间的方法，对已进行聚类的用户端资源进行初步的搜索。

2) 利用余弦理论，对整个用电需求端的资源与查询之间的相似性进行计算，并将其按某种规则进行排序，将排名靠前的几种用电需求端资源构成一个扩充查询表达式所需要的关联信息集，再通过交互自反馈法拓展该原始查询表达式，从而获得新的查询表达式。

3) 整合查找类型、分类特征向量和分类关键词等，并对其进行综合解析，再通过对位置关联类别的相似性计算获得相似性，将相似性最高的类别信息回馈给用户，实现对所搜索的关联类别进行快速、精确的定位。

2 改进粒子群算法下交直流配电网分布式调度

改进粒子群算法可以有效地进行全局搜索，在解空间中广泛探索，并找到潜在的全局最优解。这对于复杂的交直流配电网负荷分布式调度问题非常重要，因为需要考虑多个节点的负荷平衡和优化，而且存在多个目标函数。改进粒子群算法具有自适应性，即随着搜索过程的进行，粒子的速度和位置可以自动调整。这使得算法能够更好地适应问题的特征和搜索空间，并在不同阶段进行有效的搜索和优化。因此，为实现配电过程的最小成本，保证交直流配电网出力稳定性且弃风率最低，设计改进粒子群算法下交直流配电网负荷分布式调度方法。

计算步骤如下：

假设第 i 个粒子的方位为 X_i ，则粒子的位置更新速度为：

$$V_i' = V_i + k_1(R_{id}^q - X_{id}^q) + k_2(R_{gd}^q - X_{gd}^q) \quad (1)$$

式中， V_i 为粒子的移动速率； R_{id} 为粒子移动的最优方位； R_{gd} 为全部种群历经过的最优方位； k_1 、 k_2 为权重因子。通过式 (1)，结合惯性权重指数 ζ ，

粒子可实现自主调节：

$$\zeta = \frac{\zeta_{\max} - u(\zeta_{\max} - \zeta_{\min})}{u_{\max}} \quad (2)$$

式中， u_{\max} 为迭代最大值； u 为迭代次数。

引入混沌优化策略，改进粒子群算法。混沌优化策略可以增加算法的多样性、全局搜索能力和收敛性，从而提高算法在复杂问题中的优化性能。混沌优化策略通过引入混沌序列来增加算法的随机性和探索性，以更好地探索解空间，并找到潜在的全局最优解。通过将混沌优化策略与粒子群算法结合，可以提升算法的搜索能力和解决复杂配电网负荷分布式调度等问题的效果。这种改进为算法的收敛性和全局优化能力带来了新的可能性，有助于更好地应对实际问题的复杂性和多目标性。调度模型构建如下：

$$D = (d_1, d_2, \dots, d_n) \quad (3)$$

$$\text{s.t. min } U = f(d)$$

式中， d 为决策变量矢量； U 为目标矢量； $f(d)$ 为约束条件。

3 实验分析

为了验证研究方法的应用有效性，设计以下实验。从 IEEE 电力和能源学会（IEEE PES）数据集中，选取 B 城市小型的交直流配电网工业园区的相关数据为实验样本。该配电网含有 1 个风电场，容量为 900MW。选取 2023 年 11 月 10 日全天 24h 为例，对比交直流配电网分布式调度前后的弃风情况。弃风量指标在交直流配电网调度效果的验证中是一项重要指标，它反映了调度策略对可再生能源的利用效率和供需平衡的影响。通过降低弃风量，可以提高风力发电系统的经济性和可持续性，并且减少对传统能源的依赖。因此，本次实验采用较低的弃风量作为指标可以评估交直流配电网调度方法在最大程度利用风能资源方面的效果。测试结果如图 2 所示。

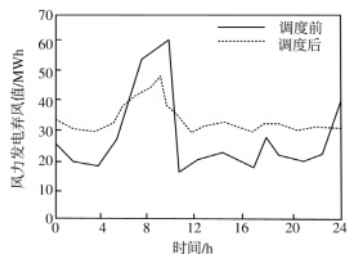


图 2 分布式调度前后交直流配电网弃风曲线对比

根据图 2 可知，通过研究方法对交直流配电网完成调度后，其风力发电的弃风值显著降低。这是因为研究方法兼容了需求侧资源，通过合理调度负荷和可再生能源之间的协同运行，可以更好地平衡供需关系。在负荷高峰期，如果存在大量的可再生能源供应（如风力发电），但传统的输电系统无法完全消纳，容易导致弃风现象。而使用改进的分布式调度方法，可以根据实际需求和可再生能源产生情况，合理分配和调度能源，减少弃风情况的发生，从而降低弃风值。

基于以上实验结果，为了验证本文提出的电力需求侧资源分布式检索的有效性，采集实验环境的实际负荷数据，将其与研究方法的检索结果进行对比。选择负荷波动较大的 08：00~16：00 为测试时间，对比结果如表 1 所示。

表 1 检索值与实际负荷对比

时刻	实际负荷/kW	研究方法	文献[4]方法	文献[5]方法
		检索值/kW	检索值/kW	检索值/kW
08:00	856.70	856.61	1125.04	895.61
10:00	1125.69	1125.12	1125.63	1124.07
12:00	1567.85	1567.87	1562.47	1426.87
14:00	1754.20	1754.23	1657.22	1620.85
16:00	1254.77	1254.73	1324.70	1367.55

由表 1 可知，与文献 [4] 方法和文献 [5] 相比，研究方法能够更准确地检索出交直流配电网的负荷数据，有助于配电网的调度。这是因为本研究引入了资源分布式检索模型，并应用查询扩展和分类方法。这种方法利用资源检索模型，可以更全面、准确地收集和整理负荷数据，包括负荷需求、负荷波动等因素，

提高了对负荷数据的获取和处理的精度和可靠性。通过更准确的负荷数据，可以更准确地进行分布式调度，提高系统的调度精度和效果。

为验证本文应用的改进粒子群算法自身的性能，测试其寻优收敛曲线。该曲线反映了算法在迭代过程中解的优化情况，即是否能够收敛到全局最优解或接近最优解。通过分析和比较寻优收敛曲线，能够评估改进粒子群算法在优化调度问题中的性能和效果。为获取该曲线，在每次改进粒子群算法迭代中，记录最优解或适应度值。可以选择记录全局最优解的适应度值，或记录所有粒子在每次迭代中的适应度值。迭代结束后，将记录的最优解或适应度值绘制成图表，得到寻优收敛曲线。横轴表示迭代次数，纵轴表示适应度值。改进粒子群算法、传统粒子群算法的寻优收敛曲线如图3所示。

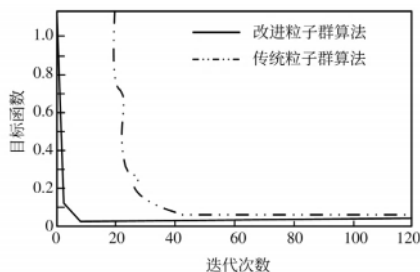


图3 寻优收敛曲线

由图3可得知，改进后的粒子群算法能够在更少的迭代次数中实现目标函数的最小化。这是因为改进的粒子群算法引入了混沌优化策略，该策略能够在搜索空间中增加随机性和多样性，从而促使算法更快地收敛到全局最优解附近。混沌优化策略能够在几次迭代之后，快速收敛到最优解附近的区域，有效减少了迭代次数。因此，在更少的迭代次数内，改进的粒子群算法能够更快地达到最小化目标函数的效果。这样可以缩短调度过程，提高算法的计算效率和响应速度。

4 结束语

本研究设计了一种兼容需求侧资源的交直流配电网分布式调度方法，搭建资源分布式检索模型并应用查询扩展和分类方法，引入混沌优化策略改进粒子群算法，可以显著降低交直流配电网的风力发电弃风值并提高负荷数据的准确性。改进后的粒子群算法还能够在更少的迭代次数内实现目标函数的最小化。

该研究方法在优化调度方面具有重要的应用前景。首先，显著降低风力发电的弃风量，有效提高可再生能源的利用率，促进清洁能源的大规模集成。其次，通过准确的负荷数据检索和分布式调度，可以提高配电网的运行效率、供电可靠性和适应性。此外，改进后的粒子群算法具有较低的迭代次数和计算复杂度，能够快速求解问题，节省时间和资源成本。

参考文献

- [1] 费有蝶, 黄蔓云, 卫志农, 等. 深度学习辅助的区域交直流配电网区间状态估计[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(1): 101-109.
- [2] 张博, 马梓耀, 王辰, 等. 含光储充一体化电站的城市交直流混合配电网韧性提升策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(12): 28-37.
- [3] 仇书山, 陈劲帆, 毛承雄, 等. 含能源路由器的交直流互联配电网协调动态优化[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 147-158.
- [4] 张志荣, 邱晓燕, 孙旭, 等. 协调柔性负荷与储能的交直流配电网经济优化调度[J]. 电力建设, 2020, 41(5): 116-123.
- [5] 谢敏, 张世平, 李弋升, 等. 基于多模式柔性互联的交直流低压配电网优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 79-89.

(收稿日期: 2024-01-24)