

基于改进差分进化算法的 CCHP 型 微电网两阶段调度优化方法

邓 晨^{1,2}

(1. 同济大学电子与信息工程学院 2. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司)

摘要: 由于 CCHP 型微电网两阶段调度需求的随机性, 导致优化难度较大, 难以找到有效的解决方案。因此, 本文提出基于改进差分进化算法的 CCHP 型微电网两阶段调度优化策略。将微电网运行状态空间划分, 构建 CCHP 型微电网两阶段调度优化模型, 利用改进差分进化算法对微电网两阶段调度优化方案进行求解, 实现 CCHP 型微电网两阶段调度优化。设计对比实验, 实验结果证明该方法的调度转化效率最高, 能够最大限度地利用。

关键词: 改进差分进化算法; CCHP 型微电网; 两阶段调度; 优化方法

0 引言

随着可再生能源的广泛应用和分布式电源的普及, 微电网在智能电网中的地位日益凸显。CCHP 型微电网以其高效、环保和灵活的特性, 在能源供应中占据了重要地位。然而, 如何实现 CCHP 型微电网的两阶段调度优化, 提高能源利用效率和系统稳定性, 成为当前面临的重要挑战。传统的调度优化方法往往面临优化效率低下、容易陷入局部最优等问题^[1]。为了解决这些问题, 本文提出一种基于改进差分进化算法的 CCHP 型微电网两阶段调度优化方法。改进差分进化算法作为一种全局优化算法, 具有简单、高效、鲁棒性强的优点, 被广泛应用于各种优化问题。在第一阶段, 目标是使总运行成本最小化。这一阶段主要关注的是能源的经济性和环保性。通过优化调度, 可以降低能源成本, 提高经济效益和环保性能。在第二阶段, 目标是使碳排放量最小化。通过优化调度, 可

以减少碳排放量, 降低对环境的影响, 促进可持续发展。通过两阶段的优化调度, 实现 CCHP 型微电网的高效、稳定运行^[2]。这不仅提高能源利用效率和系统稳定性, 还为智能电网的发展提供有益的参考。在实际应用中, 可以根据具体的情况和需求, 调整和优化调度方案, 以实现更好的能源供应和环保性能。

1 设计基于改进差分进化算法的 CCHP 型微电网两阶段调度优化方法

1.1 微电网运行状态空间划分

为了实现 CCHP 型微电网两阶段调度优化方法, 首先需要对微电网的不同运行状态进行合理划分。微电网的运行状态可以由状态空间向量来表示, 这有助于更精确地描述微电网在两个调度阶段中的运行特性。

1) 等效净负荷的状态变量 E 。这个状态变量是用来描述微电网当前可再生能源的总发电功率与总负

荷之间的供求关系的重要工具。具体来说， E 是微电网负荷与可再生能源发电功率之差。通过这个状态变量，可以深入了解微电网在某一时刻的能源供需状况。等效净负荷的状态变量的数学表达式为：

$$E = \begin{cases} 1, P \leq 0 \\ 0, P \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中， P 为等效净负荷的预测值。其中 P 的表达式为：

$$P = P_1 + P_2 - \sum_{i=1}^M P_3 \quad (2)$$

式中， P_1 为总负荷预测值； M 为不可控可再生能源电源总数； P_2 为可再生能源电源发电功率预测值； P_3 为微电网网损。通过合理划分微电网的状态空间向量，可以更好地理解微电网的运行特性和潜在的优化空间。

2) 为了更精确地描述微电网的储能水平状态，引入储能水平状态变量 L 。这个变量主要用于比较微电网当前储能荷电状态 SOC_0 与下一个 5min 时段的最佳荷电状态 SOC_b 之间的关系。通过这种比较，可以了解在接下来的调度周期内，储能设备应该处于充电状态还是放电状态。这有助于优化储能设备的运行，提高微电网的能源利用效率和稳定性。储能水平状态变量的数学表达式为：

$$L = \begin{cases} 0, SOC_0 \geq SOC_b \\ 1, SOC_0 < SOC_b \end{cases} \quad (3)$$

如果储能水平状态变量的值等于 0，表示当前储能荷电状态高于最佳荷电状态，因此在下一个调度周期内，储能设备应该进行充电。如果储能水平状态变量的值等于 1，则表示当前储能荷电状态低于最佳荷电状态，因此在下一个调度周期内，储能设备应该进行放电。通过这个表达式，可以明确储能设备的充放电状态，从而更好地进行调度优化。

3) 为了更准确地描述微电网在下一调度周期所处的运行时段，引入峰平谷状态变量 T 。这个变量主

要用于区分微电网在不同时段的运行状态，例如高峰、平峰和低谷时段。通过了解微电网所处的时段，可以更有效地调整能源的供应和需求，从而实现更高效的调度。假设下一调度周期为 y ，峰平谷状态变量 T 的数学表达式为：

$$T = \begin{cases} 0, y \in \text{峰时段} \\ 1, y \in \text{平时段} \\ 2, y \in \text{谷时段} \end{cases} \quad (4)$$

通过引入峰平谷状态变量，可以更好地了解微电网在不同时段的运行状态，并根据时段的特性进行相应的调度优化。由上述 3 个状态变量构成的微电网状态向量 $Z^{[5]}$ ，其表示式为：

$$Z = [E, L, T] \quad (5)$$

根据上式，可以将微电网运行的状态空间划分。

1.2 构建 CCHP 型微电网两阶段调度优化模型

根据微电网运行状态空间划分的成果，构建 CCHP 型微电网两阶段调度优化模型。这一模型的主要目标是通过优化微电网的运行策略，实现更高的能源利用效率和稳定性。

第一阶段的目标是微电网总运行成本最小化^[6]。总运行成本由固定成本和可变成本两部分组成。固定成本主要包括设备折旧和维护费用等；可变成本则包括能源消耗费用和人工费用等。假设总运行成本为 C ，固定成本为 C_1 ，可变成本为 C_2 。因此，第一阶段的目标函数可以表示为：

$$C = \sum Z \times (C_1 + C_2) \quad (6)$$

其中， C_1 和 C_2 的计算公式分别为：

$$\begin{cases} C_1 = a \times N + b \times H \\ C_2 = c \times R + d \times Q \end{cases} \quad (7)$$

在上式中， N 为设备数量； H 为设备投资； R 为能源消耗量； Q 为能源价格；参数 a 、 b 、 c 、 d 分别为相应的权重系数。

第二阶段的目标是微电网碳排放量的最小化^[7]。

碳排放主要来源于能源消耗，假设碳排放量为 X 。因此，第二阶段的目标函数可以表示为：

$$X = \int C \times e \times R \quad (8)$$

式中， e 为碳排放系数； R 为能源消耗量。

综合第一阶段和第二阶段的目标函数，可以得到 CCHP 型微电网两阶段调度优化模型：

$$f = C_1 + C_2 + X \quad (9)$$

综上所述，完成了 CCHP 型微电网两阶段调度优化模型的构建。这一模型旨在通过优化微电网的运行策略，实现更高的能源利用效率和稳定性^[8]。通过合理地应用这一模型，可以为微电网的运行和管理提供有益的参考和指导。

1.3 基于改进差分进化算法的微电网两阶段调度优化方案求解

根据 CCHP 型微电网两阶段调度优化模型，采用改进差分进化算法来求解微电网的两阶段调度优化方案。差分进化算法是一种基于种群的启发式搜索算法，通过种群中个体的竞争、合作和交叉变异来寻找最优解^[9]。这种算法采用种群的方式进行搜索，通过种群中个体的竞争与合作，不断向最优解靠近。具体实施步骤如下：

1) 需要初始化一个种群。这个种群由多个随机生成的解组成，每个解代表一种可能的调度方案。这些解包含了设备的运行状态、能源的消耗和价格等信息。

2) 需要评估每个解的适应度。适应度评估是根据 CCHP 型微电网两阶段调度优化模型的目标函数进行的。在第一阶段，目标是使总运行成本最小化，因此将总运行成本函数作为适应度函数。在第二阶段，目标是使碳排放量最小化，因此将碳排放量函数作为适应度函数。

3) 进行选择操作。这一步的目的是从当前种群中选择出优秀的个体，以构成下一代种群。采用锦标赛选择策略，随机选取一定数量的个体，比较它们的

适应度值，将最好的个体保留下来。

4) 交叉操作。根据个体的适应度和种群的多样性来调整交叉概率，对选定的个体进行交叉操作，生成新的解。通过交叉操作，可以产生具有新特性的解，增加种群的多样性。

5) 变异操作。根据个体的适应度和种群的多样性来调整变异步长，对新的解进行变异操作，生成更新的解。通过变异操作，可以产生具有新特性的解，进一步增加种群的多样性。

6) 重复上述选择、交叉和变异操作，直到满足终止条件或达到预设的最大迭代次数。终止条件可以是算法达到预设的精度要求、找到满意的近似最优解等。

7) 输出最终得到的最优解即为微电网的两阶段调度优化方案。在第一阶段，最优解对应于最小的总运行成本；在第二阶段，最优解对应于最小的碳排放量。通过这种改进的差分进化算法，可以有效地求解微电网的两阶段调度优化问题，为微电网的运行和管理提供有益的决策支持^[10]。

综上所述，基于改进差分进化算法的微电网两阶段调度优化方案的实施流程见图 1。

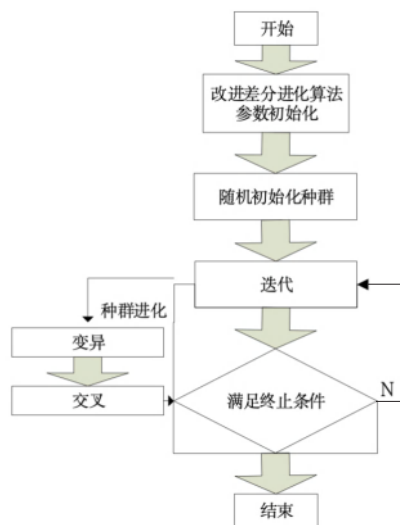


图 1 基于改进差分进化算法的微电网两阶段调度优化方案的实施流程图

2 实验论证

2.1 实验准备

为了验证所提出方法的实际效果，选择 IEEE 33 节点 CCHP 型微电网测试系统作为实验平台，进行仿真实验。该测试系统能够模拟真实环境中的微电网运行情况，包括各种设备、负荷和能源的供应与需求。根据实验要求，将系统电压设定为 11V，这是微电网运行中的常见电压等级。这样的设定能够更好地模拟实际运行中的情况，为验证方法的实际效果提供了有力支撑。同时，为了模拟实际的有功和无功负荷情况，将可承载有功负荷值设定为 3000kW，可承载无功负荷设定为 2000kvar。这些参数的设置旨在模拟实际运行中的各种约束条件，包括设备的容量、负荷的需求等。通过这些参数的设置，可以更好地检验方法的适用性和有效性。测试系统基本结构如图 2 所示。



图 2 IEEE 33 节点配电网测试系统结构图

为了更贴近真实主动配电网的应用环境，在 IEEE 33 节点配电网测试系统中进行进一步的定制和调整。具体来说，将电源接入节点 9 与节点 2，并在节点 32 与节点 23 的位置安装微型电网。这种配置更接近实际应用中的布局 and 连接方式，增强了实验的实用性和参考价值。在所引入的微电网中，选用微型燃气轮机作为主要的分布式电源。这种燃气轮机具有较高的效率和可靠性，是实际应用中常见的选择。其额定功率为 300kW，能够满足一定的电力需求。此外，微电网中还包含燃气轮机、光伏设备和风力机组，这些都是当前主流的可再生能源技术，能够为微电网提供多样化的能源供应。关于配电网测试系统的其他参数，考虑各支路的年最大负荷利用时间，这一时间设定为 150h。

这一参数对于评估系统的效率和稳定性至关重要。另外，还设定单位售电价格为 1.0 元 / kWh，这是基于当前的市场价格和政策指导，使得实验结果更具有实际意义。基于上述的设定和参数选择，进行仿真实验，并将这些设定结果作为测试的基础。通过这些实验，可以观察到 CCHP 型微电网在定制和调整后的配电网测试系统中的运行情况，并评估两阶段调度优化方法的效果。

2.2 实验结果分析与结论

在经过精心设计和准备的实验环境中，针对不同的调度方法进行实验。实验的目的是对比分析不同调度方法下调度转化效率，分析结果见表 1。

表 1 不同调度方法下能源之间转化效率对比

调度方法	传统方法 1	传统方法 2	本文方法
	调度转化效率 (%)		
1	89.7	93.4	98.7
2	90.2	95.8	99.5
3	89.6	92.9	97.9
4	91.4	90.7	98.8
5	90.9	89.9	99.9

从表 1 的对比结果可知，本文方法的调度转换效率最高达到 99.9%，这一数值远高于传统方法 1 的 91.4% 和传统方法 2 的 95.8%。

3 结束语

基于改进差分进化算法的 CCHP 型微电网两阶段调度优化方法，不仅提高了微电网的运行效率，还为未来的智能电网发展提供了有益的参考，为人类创造一个更加美好的能源利用环境。

参考文献

- [1] 罗明, 罗博雅, 冯昊, 等. 基于亨利气体溶解度优化算法的电动汽车二阶段优化调度方法 [J]. 智慧电力, 2023, 51 (9): 46-51.

(下转第 90 页)

(上接第 85 页)

- [2] 马跃, 孟润泉, 魏斌, 等. 考虑阶梯式碳交易机制的微电网两阶段鲁棒优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 22-33.
- [3] 徐嘉启, 郭红霞, 邹桂林. 基于实时电价的含电动汽车微电网两阶段优化调度[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(13): 5571-5578.
- [4] 袁天梦, 侯鑫垚, 廉杰. 主动配电网下分布式能源系统双层两阶段调度优化模型[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(5): 1978-1983.
- [5] 张高航, 李凤婷. 计及运行风险和备用可用性的含风电系统两阶段优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 139-148.
- [6] 周修宁, 蒋传文, 王旭, 等. 基于分布鲁棒的梯级水光蓄系统日前-实时两阶段调度方法[J]. 电气自动化, 2022, 44(3): 5-7.
- [7] 杨镜司, 秦文萍, 史文龙, 等. 基于电动汽车参与调峰定价策略的区域电网两阶段优化调度[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 58-71.
- [8] 魏震波, 张海涛, 魏平桢, 等. 考虑动态激励型需求响应的微电网两阶段优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 1-10.
- [9] 曹子珣, 陈红坤, 胡畔, 等. 计及市场收益的含储能火电厂日前-日内两阶段优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 106-113.
- [10] 桑博, 张涛, 刘亚杰, 等. 期望场景下的并网型微电网两阶段鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6161-6173.
- (收稿日期: 2024-04-02)**