

# 基于电力需求侧响应的主动配电网分布式发电单元优化调度

姜雪娇,张昌庆,覃刚,钟磊,周朝俊,陈育培  
(海南电网有限责任公司,海南海口 570100)

**摘要:**为了平衡主动配电网中可再生能源与负荷间的出力差值,降低预算成本和用户购电费用,研究提出基于电力需求侧响应的主动配电网分布式发电单元优化调度方法。以电力需求侧响应为前提,设定分布式发电单元优化调度优先级,结合以主动配电网发电成本费用总值最低为目标而建立的目标函数,设置主动配电网调度周期内所有时间段的节点电压、潮流方程、储能系统荷电状态以及柔性负荷的功率极限约束条件,并以此为基础构建主动配电网分布式发电单元优化调度模型。最后,再利用改进后的粒子群算法对模型进行求解,从而得到最终的优化调度结果。实验结果表明,所提方法可以有效平衡可再生能源与负荷之间的发电出力差值,既提升了主动配电网对可再生能源的消纳能力,也降低了发电预算开支和用户购电成本。

**关键词:**电力需求侧;主动配电网;分布式发电单元;改进粒子群算法;优化调度;源荷共赢

**中图分类号:**TM324 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd25154

## Optimize Scheduling of Distributed Generation Units in Active Distribution Network Based on Power Demand Side Response

JIANG Xuejiao, ZHANG Changqing, QIN Gang, ZHONG Lei, ZHOU Chaojun, CHEN Yupe  
(Hainan Power Grid Corporation Ltd., Haikou 570100, Hainan, China)

**Abstract:** In order to balance the output difference between renewable energy and load in the active distribution network and reduce the budget cost and user purchase cost, an optimal dispatching method of distributed generation units in the active distribution network based on power demand side response was proposed. On the premise of power demand side response, set the optimal dispatching priority of distributed generation units, combined with the objective function established with the total generation cost of active distribution network as the minimum objective, set the node voltage, power flow process, state of charge of energy storage system and power limit constraints of flexible load in all time periods of the active distribution network dispatching cycle, on this basis, the optimal dispatching model of active distribution network distributed generation units was constructed. Finally, the improved particle swarm optimization algorithm was used to solve the model and obtain the final optimized scheduling result. The experimental results show that the proposed method can effectively balance the difference in power generation output between renewable energy and load, which not only improves the absorption capacity of active distribution networks for renewable energy, but also reduces power generation budget expenses and user purchase costs.

**Key words:** power demand side; active distribution network; distributed generation unit; improved particle swarm optimization algorithm; optimize scheduling; source load win-win situation

目前,随着分布式发电模式逐渐被广泛应用到主动配电网当中,呈现出高渗透、高运用率的特点,切实提升了主动配电网主动管理和控制能力,彻底将被动式接收电能方式转换成了需求侧

主动响应方式。分布式发电单元主要包括柔性负荷、可再生能源以及储能,对其进行调度能够合理调控这些发电单元,提高对可再生能源以及清洁能源的消纳能力,从而达到节能降损、提高

**基金项目:**中国南方电网有限责任公司科技项目(073000KK52180005)

**作者简介:**姜雪娇(1985—),女,本科,高级工程师,主要研究方向为营销计量、电能量数据应用、计量自动化等,Email:rrqq021@163.com

供电质量以及运行可靠的目的。然而,由于可再生能源在发电过程中具有较强的随机性和波动性,无法获得连续耦合相关性以及时间转移特性等特征,难以适应分布式发电单元的主动配电网。为此,开展以电力需求侧响应为前提条件的分布式发电单元优化调度,具有重要的意义和价值。

文献[1]利用“源-荷”集群策略,将主动配电网分为上、下两个层次,从不同角度分别进行优化调度。上层以全局优化为主,主要针对“源-荷”集群计算功率偏差,实现分布式协调优化;下层以局部优化为主,对分布式单元进行协调优化后,得到最佳效率下的“源-荷”集群,再将两层策略结合在一起,完成主动配电网整体的优化调度。文献[2]从两个阶段实现对主动配电网的分布式优化调度。第一阶段以有功优化为主,将主动配电网总的成本费用最低作为目标,通过对现有发电资源进行有功调节,完成主动配电网初期经济的优化调度;第二阶段以无功优化为主,基于经济优化,将发电损耗最低作为目标,通过对现有发电资源进行无功调节,完成主动配电网后期损耗的优化调度。利用交替方向乘子法,将有功优化和无功优化整合后再分解,得到若干个子模型,通过相邻区间进行期望信息交互,实现主动配电网分布式优化调度。文献[3]基于拉丁超立方采样方法,分析风电场中的不确定性,建立储能系统模型,以分布式储能、气轮机、配电网买卖电成本作为目标函数,并采用优化后的粒子群算法进行求解,获取最优调度方案。文献[4]等以主动配电网的最小运行成本作为目标,建立随机规划模型,基于Benders分解算法分解主问题和子问题,并进行求解,将区域最优运行成本作为最优目标,根据同步型交替方向乘子法完成分布式计算,实现全局最优调度。文献[5]提出了一种结合拓扑重构、BES优化和负载响应的协调日前调度方法在线性潮流模型的基础上,建立了可再生能源的线性电流注入模型,并提出了一种可扩展的线性开关运算方法来解决网络重构问题,提高配电网优化调度能力。文献[6]建立了一种基于电池的集成储能-太阳能光伏系统的能源管理平台,通过制定充/放电的最佳调度算法,将净能源购买成本降至最低,基于模糊逻辑的速度控制策略提高工艺效率。将随机优化问题公式化为混合整数线性规划,以实现能源的最优调度。

由于上述几种方法并未考虑柔性负荷与储

能装置之间的协调作用,导致最终的优化调度结果较差。为此,提出基于电力需求侧响应的主动配电网分布式发电单元优化调度方法。在本次研究中,通过设定分布式发电单元优化调度的优先级、设置储能系统荷电状态约束条件和以主动配电网调度周期的所有时间段为基础构建优化调度模型,体现储能的调度和配置。其中,优化调度需要考虑分布式发电单元的优先级设定,该步骤涉及到如何合理配置储能以及确定其在系统中的重要程度;储能系统的荷电状态是储能配置的一个关键参数,需要根据实际需求和系统特点来设定相应的约束条件,以确保储能系统按照预期进行荷电和放电操作;优化调度模型是对储能配置的数学表达,通过考虑主动配电网调度周期内的各个时间段,可以更准确地对储能配置进行建模,包括储能系统的容量、技术选择等方面。在实验测试中,所提方法针对主动配电网测试系统取得了理想的优化调度结果,使主动配电网发电成本和用户的用电成本得以降低,在一定程度上提高了用户对电力系统的用电满意度。

## 1 分布式发电单元优化调度优先级设定

在考虑电力需求侧响应的基础上,对储能、分布式发电单元以及柔性负荷的调度优先级进行设定。将光伏、风力和储能等不同的能源发电方式进行互补优化,使分布式发电单元、柔性负荷以及储能装置实现协调优化调度,以此来提高可再生能源利用率和发电可靠性,降低主动配电网发电成本和用户购电费用,实现主动配电网和用户的双赢。

### 1.1 降低发电预算成本

柔性负荷是一种具有调整和适应能力的电力负荷,它可以在电力系统的需要下做出灵活的响应。相对于传统的固定负荷,柔性负荷具有较高的灵活性和可调度性,通常应用于一些大型工业企业或商业建筑,其拥有灵活的生产线、恒温调节系统、储能装置等,可以通过调整工艺流程、调整温度设定、调度储能装置等手段,实现对用电负荷的调控和优化。其优点是具有良好的负荷响应能力、可降低电压频率波动、提高可再生能源的利用率;但也具有成本高、需要先进的自动化技术参与的缺点。通过在电力系统中引入柔性负荷,可以优化电力供需匹配,减少网损,降

低主动配电网的发电成本和用户的购电费用。

针对可再生能源的高随机性和高波动性的特性,储能系统充分发挥了其调整性、双向互动性以及柔性负荷的主动参与能力<sup>[7]</sup>,以此作为重要的技术手段。在多能互补发展中,可再生能源(如光伏和风机)因更具环保性和经济性,被广泛应用。储能系统作为一个辅助性设备,具有调度灵活性优势,被赋予了较低的调度优先级,目的是通过其柔性负荷、调度能力等特点来平滑可再生能源的波动性,提高了系统的稳定性和可靠性。基于上述内容,得出的发电成本为

$$f_g = \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{n=1}^N C_{\text{wind},n}(t) P_{\text{wind},n}(t) \Delta t + \sum_{m=1}^M C_{\text{PV},m}(t) P_{\text{PV},m}(t) \Delta t + \sum_{i=1}^I C_{\text{KDG},i}(t) P_{\text{KDG},i}(t) \Delta t \right] \quad (1)$$

式中: $C_{\text{wind},n}$ 、 $P_{\text{wind},n}$ 分别为风力发电成本费用和有功出力; $C_{\text{PV},m}$ 、 $P_{\text{PV},m}$ 分别为光伏发电成本费用和有功出力; $C_{\text{KDG},i}$ 、 $P_{\text{KDG},i}$ 分别为分布式发电单元成本费用和有功出力; $t$ 为一个调度周期的时长, $t \in T$ ;  $n, m, i$ 分别为风力发电站、光伏发电站以及分布式发电单元的数量, $n \in N, m \in M, i \in I$ 。

## 1.2 减少储能等效运行成本

储能可以对可再生能源出力瞬时波动实现快速且精准的调节,根据主动配电网的运行状态进行灵活充放电,在一定程度上提高了主动配电网的供电质量和对可再生能源的消纳能力<sup>[8]</sup>。储能装置使用寿命与主动配电网的放电深度之间呈现负相关关系,随着放电深度的增加,储能装置寿命随之缩短。因此,将储能系统的调度优先级设置为最高。在对储能系统放电次数、充放电功率和状态切换等产生的一系列损耗进行了综合考虑后,计算储能等效运行成本,公式为

$$f_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^T C_{\text{loss}}(t) P_{\text{BESS,loss}} \quad (2)$$

其中

$$P_{\text{BESS,loss}} = \sum_{g=1}^G \left[ \mu_{\text{BESS},g} \Delta P_{\text{BESS},g}(t) + (1 - \eta_{\text{in},g}) P_{\text{Bin},g}(t) + (1 - \eta_{\text{out},g}) P_{\text{Bout},g}(t) \right] \quad (3)$$

$$C_{\text{loss}} = \frac{C_p P_{\text{BESS},X} + C_w W_{\text{BESS},X}}{X_{\text{BESS}}(D_{\text{od}})} \quad (4)$$

式中: $C_{\text{loss}}(t)$ 为单个调度周期内储能装置的等效运行成本; $C_p$ 为功率一定时的储能发电成本; $C_w$ 为容量一定时的储能发电成本; $P_{\text{BESS},X}(t)$ 为储能

装置的额定有功功率; $W_{\text{BESS},X}$ 为储能装置的额定容量; $X_{\text{BESS}}$ 为储能装置的寿命年限; $P_{\text{BESS,loss}}(t)$ 为储能装置发电过程中产生的损耗值; $D_{\text{od}}$ 为发电深度<sup>[9]</sup>; $\eta_{\text{in},g}$ 、 $P_{\text{Bin},g}(t)$ 分别为储能系统的充电效率和功率; $\eta_{\text{out},g}$ 、 $P_{\text{Bout},g}(t)$ 分别为储能装置的放电效率和功率; $g \in G$ 为主动配电网中的储能系统数量; $\mu_{\text{BESS},g}$ 为储能状态变化量纲; $\Delta P_{\text{BESS},g}(t)$ 为第 $g$ 个储能装置切换状态产生的损耗值。

## 1.3 降低源荷共赢成本

在主动配电网中,要实现源荷共赢,就必须综合考虑柔性负荷、用户购电费用等因素的影响。一方面,通过对柔性负荷进行补偿与激励并与分时售购电价机制相结合,促进电力消费模式与结构的优化调整;另一方面,通过设置主动配电网调度优先级,在减少用电损耗的同时还能降低用户购电成本,提高用户对主动配电网优化调度的响应积极性。通过对上述两方面的协调优化,使主动配电网负荷曲线得到有效改善。因此,将柔性负荷的调度优先级设定为最低,源荷共赢成本费用计算公式为

$$f_{\text{load}} = \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{l=1}^L C_l(t) Y_l(t) \Delta t + \sum_{y=1}^Y \xi_{\text{trload},y} \mu_{\text{trload},y} Y_{\text{trload},y}(t) \Delta t + \sum_{q=1}^Q \xi_{\text{zload},q} \mu_{\text{zload},q} Y_{\text{zload},q}(t) \Delta t \right] \quad (5)$$

式中: $\xi_{\text{trload},y}$ 、 $\mu_{\text{trload},y}$ 分别为可平移负荷的激励系数和状态系数; $\xi_{\text{zload},q}$ 、 $\mu_{\text{zload},q}$ 分别为可中断负荷的中断补偿系数<sup>[10]</sup>和状态系数<sup>[11]</sup>; $Y_{\text{trload},y}(t)$ 、 $Y_{\text{zload},q}(t)$ 分别为增加的可平移负荷容量和减少的中断负荷容量; $C_l$ 为实时电价; $Y_l$ 为负荷功率; $l \in L$ 为负荷数量; $p \in P, q \in Q$ 分别为可平移以及可中断的负荷数量。

## 2 构建电力需求侧响应的主动配电网优化调度模型

### 2.1 电力需求侧响应目标函数

主动配电网优化调度的前提是保证成本费用最低,将其作为目标函数构建分布式发电单元优化调度模型,同时将主动配电网作为与主电网进行电能交易的活跃参与者。根据设定的调度优先级与分时售购电价相结合,以 $f_g$ 、 $f_{\text{loss}}$ 和 $f_{\text{load}}$ 为子目标,构造的目标函数如下式所示:

$$F = \min(\lambda_{\text{mul-g}} f_g + \lambda_{\text{mul-loss}} f_{\text{loss}} + \lambda_{\text{mul-load}} f_{\text{load}} + C_{\text{Line}} P_{\text{Line}}) \quad (6)$$

式中: $\lambda_{mul-g}, \lambda_{mul-loss}, \lambda_{mul-load}$  分别为 $f_g, f_{loss}$  和 $f_{load}$  的权重系数,满足 $\lambda_{mul-g} + \lambda_{mul-loss} + \lambda_{mul-load} = 1$ ;  $C_{Line}$  为电力市场实时售购电价; $P_{Line}$  为主动配电网电能容量。

### 2.2 约束条件

对主动配电网分布式发电单元进行优化调度,必须综合考虑全运行周期中各时段的约束。因此,所提方法除了对节点电压约束和潮流方程约束进行了分析计算外,还对储能系统的荷电状态极限和柔性负荷的功率极限进行了分析计算,具体如下:

1)发电单元出力约束和潮流方程约束:

$$\sum P_{KDG}(t) = \sum [P_l(t) - P_{lx}(t) + P_d(t) + P_{Bin}(t) + P_{Bout}(t)] \quad (7)$$

式中: $P_l(t)$  为分布式发电单元的有功损耗<sup>[12]</sup>;  $P_{lx}(t), P_d(t)$  分别为主动配电网中负荷的削减功率和用电功率。

$P_{KDG}$  的上、下限约束为

$$P_{KDG}^{min} \leq P_{KDG} \leq P_{KDG}^{max} \quad (8)$$

2)主动配电网节点电压约束为

$$U_i^{min} \leq U_i \leq U_i^{max} \quad (9)$$

式中: $U_i$  为主动配电网节点电压。

3)可减少负荷的削减极限约束为

$$P_{cjmin} \leq P_{cj} \quad (10)$$

式中: $P_{cj}$  为可削减负荷的有功出力。

4)储能装置功率约束、荷电状态约束以及能量平衡约束:

$$(P_{Bin} + P_{Bout})^{min} \leq P_{Bin} + P_{Bout} \leq (P_{Bin} + P_{Bout})^{max} \quad (11)$$

$$S_{OC,g}^{min} \leq S_{OC,g} \leq S_{OC,g}^{max} \quad (12)$$

$$E_{Ess,g}(0) = E_{Ess,g}(96) \quad (13)$$

式中: $S_{OC,g}$  为第 $g$  个储能装置的荷电状态,通常取值在5%~95%之间; $E_{Ess,g}(0), E_{Ess,g}(96)$  分别为储能装置的初始能量和剩余能量。

通过上述分析计算可以看出,主动配电网分布式发电单元优化调度模型中含有多个决策变量、连续变量和离散控制变量,从根本上来说该模型属于混合整数非线性约束规划问题。综合考虑之下,选取粒子群算法来求解调度模型。

### 3 分布式发电单元优化调度模型求解

粒子群算法<sup>[13]</sup>因其具备无法比拟的寻优能力,在配电网重构、主动配电网优化调度以及微网经济运行等领域被广泛应用。由于主动配电网分布式发电单元优化调度模型中含有一些离

散控制变量,传统粒子群算法极易陷入局部最优。为此,将非线性递减惯性权重引入到传统粒子群算法中,以用于平衡寻优过程中的搜寻范围。

将非线性递减惯性权重引入到粒子群算法中,使算法整体跳出次优解。改进后的粒子群算法表达式为

$$\begin{cases} V_{id}^{k+1} = \omega^k V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k) \\ X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \\ \omega^{k+1} = \omega_{start} - (\omega_{start} - \omega_{end}) \cdot \left(\frac{k}{K_{max}}\right)^2 \end{cases} \quad (14)$$

式中: $k$  为迭代次数, $k \leq K_{max}$ ;  $V_{id}$  为粒子速度; $\omega$  为惯性权重系数; $c_1, c_2$  均为粒子学习能力; $P_{id}$  为单个粒子寻优最优值; $P_{gd}$  为所有粒子的寻优最优值; $X_{id}$  为第 $i$  个粒子的位置信息; $r_1, r_2$  为随机数; $\omega_{start}, \omega_{end}$  分别为初始迭代和迭代结束时的惯性权重系数。

利用式(14)对主动配电网分布式发电单元优化调度模型进行求解,经过全局搜索和局部搜索后输出得到目标函数值,具体实现过程如图1所示。

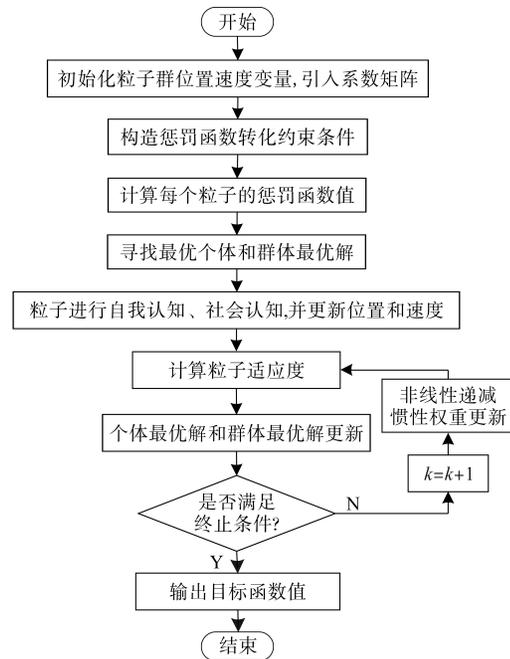


图1 分布式发电单元优化调度模型求解流程图

Fig.1 Flow chart of distributed generation unit optimal scheduling model solution

### 4 实验测试分析

为了验证所提方法是否可以取得效果最好的优化调度结果,搭建实验环境对其展开测试分析。实验是在包含4座光伏电站、2台燃气轮

机、2座风力发电站以及7个蓄电池储能的44个节点的主动配电网环境中展开,具体如图2所示。

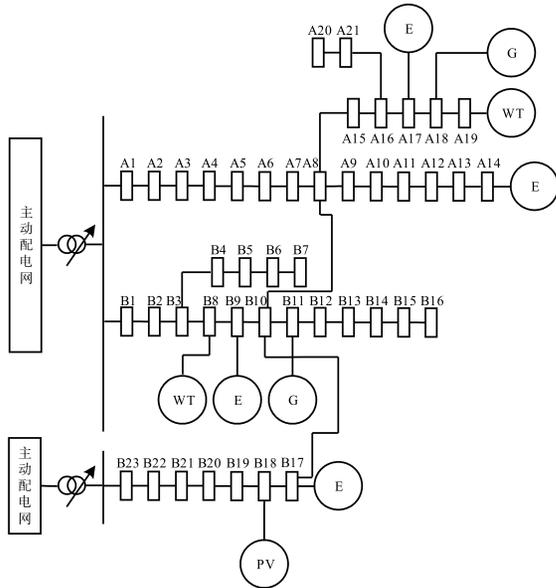


图2 44个节点主动配电网测试系统

Fig.2 44 node active distribution network testing system

在进行优化调度之前,不会将储能系统和柔性负荷纳入到调度中,此时分布式发电单元的日负荷曲线如图3所示。

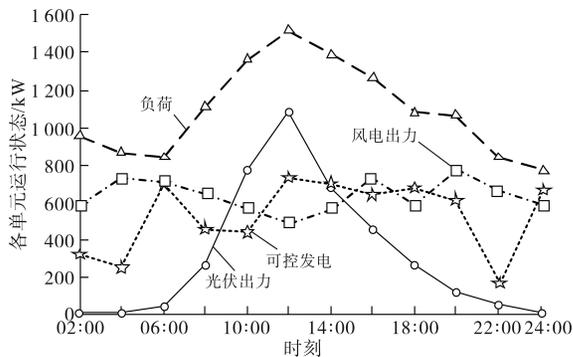


图3 优化前发电单元日负荷曲线图

Fig.3 Daily load curves of power generation unit before optimization

电力市场实时售购电价如图4所示。以主动配电网和用户双赢为目标,设定 $\lambda_{mul-g}=0.40$ , $\lambda_{mul-loss}=0.33$ , $\lambda_{mul-load}=0.27$ ,对主动配电网分布式发电单元进行优化调度,得到的运行状态如图5所示。

通过对比图3和图5可以看出,分布式发电单元经过所提方法优化调度后,储能装置和柔性负荷积极参与到调度周期中,使可再生能源发电出力曲线和负荷曲线之间的契合度得到有效提升。

再对图5中的储能出力曲线进行分析后可以发现,经过所提方法调度后,储能装置的充放电特性变得更加灵活。在可再生能源发电功率比

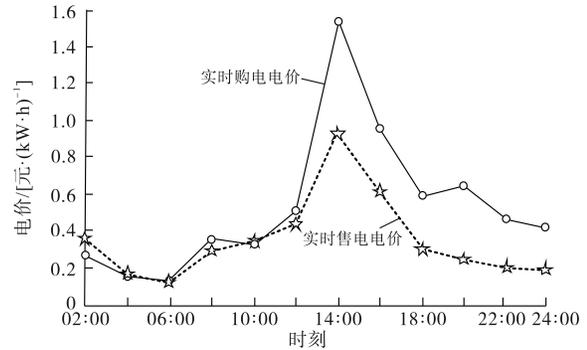


图4 电力市场实时售购电价曲线图

Fig.4 Real time selling and purchasing electricity price curve in the power market

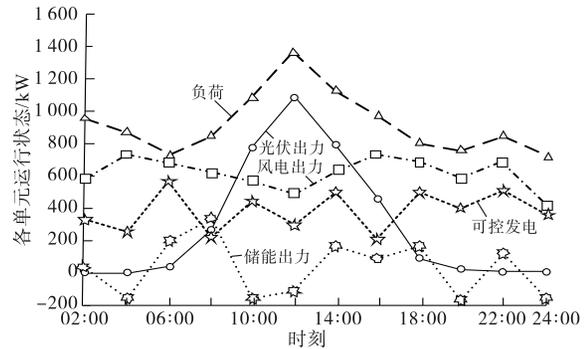


图5 优化后发电单元日负荷曲线图

Fig.5 Daily load curves of power generation unit after optimization

负荷高且电价又较低的情况下,需要给储能充电以储存电力;反之,则应该储能装置将进行放电,以平衡负荷与可再生能源之间的出力差值,保证主动配电网的正常运行。

为了验证所提方法是否可以降低主动配电网成本费用,对比优化调度前、后的成本结果如表1所示。

表1 优化调度前后主动配电网运行成本对比

Tab.1 Comparison of operating costs of active distribution networks before and after optimization scheduling

指标	优化调度前	优化调度后
发电成本/元	24 838.6	14 301.2
储能等效运行成本/元	3 012.3	2 177.2
源荷共赢成本/元	20 038.6	13 636.5
配电网总的运行成本/元	47 889.5	30 114.9

通过对比表1优化调度前、后数据可以很明显的看出,在发电成本方面,优化调度后的发电成本从24 838.6元降低到14 301.2元,表明所提方法在能源调度方面具有降低成本的能力。其次,储能等效运行成本和源荷共赢成本也都得到了明显的降低。最终,总的配电网运行成本从47 889.5元降低到30 114.9元,进一步证明了所提方法的有效性。由此可知,所提方法可有效降

低主动配电网的发电成本,从而使用户的购电成本得以降低。

## 5 结论

为实现主动配电网分布式发电单元在保证最低发电成本的前提下完成正常供电,提出了基于电力需求侧响应的主动配电网分布式发电单元优化调度方法。以主动配电网的发电成本和费用最小化为目标,建立了分布式发电单元优化调度模型,经由改进粒子群算法求解后,实现最优调度。在44个节点主动配电网中对所提方法进行实验测试,结果显示,所提方法可有效实现主动配电网的最优调度,平衡负荷与可再生能源之间的出力差值,有效降低主动配电网的运行成本和用户购电费用,实现主动配电网和用户的双赢。

### 参考文献

- [1] 詹成康,李晓露,陆一鸣,等. 基于集群的主动配电网双层分布式优化调度策略研究[J]. 电气传动,2023,53(1):81-90.  
ZHAN Chengkang, LI Xiaolu, LU Yiming, et al. Research on two-tier distributed optimal dispatch strategy of active distribution network based on cluster[J]. Electric Drive, 2023, 53(1): 81-90.
- [2] 张进,胡存刚,芮涛. 基于交替方向乘子法的主动配电网日前两阶段分布式优化调度策略[J]. 中国电力,2021,54(5):91-100.  
ZHANG Jin, HU Cungang, RUI Tao. A day-ahead two-stage distributed optimal scheduling method for active distribution network based on ADMM[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 91-100.
- [3] 陆玉姣,游青山,林林馨妍,等. 含分布式储能的主动配电网鲁棒优化经济调度方法[J]. 兰州理工大学学报,2020,46(6):112-118.  
LU Yujiao, YOU Qingshan, LIN Linxinyan, et al. Robust economic dispatch of active distribution networks with distributed energy storage systems[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2020, 46(6): 112-118.
- [4] 梁海平,王岩,刘英培,等. 计及源荷不确定性的混合交直流主动配电网分层-分布式优化调度[J]. 电力自动化设备,2021,41(12):62-69,77.  
LIANG Haiping, WANG Yan, LIU Yingpei, et al. Hierarchical-distributed optimal scheduling of hybrid AC/DC active distribution network considering source and load uncertainties[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 62-69, 77.
- [5] QIAO Xuebo, LUO Yuyao, XIAO Juanxia, et al. Optimal scheduling of distribution network incorporating topology reconfiguration, battery energy system and load response[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 8(3): 743-756.
- [6] SACHINKUMAR Suthar, NARAN Pindoriya. Energy management platform for integrated battery-based energy storage-solar PV system: a case study[J]. IET Energy Systems Integration, 2020, 2(4): 373-381.
- [7] 朱自伟,裘昕月,黄春辉,等. 基于平抑风光出力波动的主动配电网优化调度[J]. 太阳能学报,2022,43(5):90-97.  
ZHU Ziwei, QIU Xinyue, HUANG Chunhui, et al. Optimal dispatching of active distribution networks based on suppressing wind and photovoltaic power fluctuation[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(5): 90-97.
- [8] 庞凯元,王崇宇,文福拴,等. 主动配电网灵活孤岛划分与实时调度策略[J]. 电力系统自动化,2022,46(22):13-24.  
PANG Kaiyuan, WANG Chongyu, WEN Fushuan, et al. Flexible islanding partition and real-time scheduling strategy for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 13-24.
- [9] 陈倩,王维庆,王海云. 基于需求侧响应的主动配电网双层优化方法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(16):1-13.  
CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Bi-level optimization model of an active distribution network based on demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 1-13.
- [10] 马临超,齐山成,刘毅,等. 考虑分布式可再生能源的配电网电力调度优化模型研究[J]. 可再生能源,2022,40(5):703-710.  
MA Linchao, QI Shancheng, LIU Yi, et al. Research on distribution network power dispatching optimization model considering distributed renewable energy[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(5): 703-710.
- [11] 倪萌,王蓓蓓,朱红,等. 能源互联背景下面向高弹性的多元融合配电网双层分布式优化调度方法研究[J]. 电工技术学报,2022,37(1):208-219.  
NI Meng, WANG Beibei, ZHU Hong, et al. Study of two-layer distributed optimal scheduling strategy for highly elastic multi-resource fusion distribution network in energy interconnection environment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 208-219.
- [12] 陈剑飞,李珂,蒋超,等. 计及配电网灵活性的多园区综合能源系统分布式优化调度[J]. 控制理论与应用,2022,39(10):1898-1906.  
CHEN Jianfei, LI Ke, JIANG Chao, et al. Distributed optimal dispatching of multiple park integrated energy systems considering the flexibility of distribution network[J]. Control Theory & Application, 2022, 39(10): 1898-1906.
- [13] 胡冬,桂先立,蒋海明,等. 基于新型改进粒子群算法的APU建模与求解[J]. 计算机仿真,2020,37(1):35-39.  
HU Dong, GUI Xianli, JIANG Haiming, et al. Modeling and calculating of auxiliary power unit based on newly improved particle swarm optimization[J]. Computer Simulation, 2020, 37(1): 35-39.

收稿日期:2023-05-29

修改稿日期:2023-10-08