

计及权系数影响的区域电网时段多目标 调度优化策略*

吴鑫¹, 曹帅¹, 安天瑜², 郑芳芳³

(1. 中国科学院沈阳计算技术研究所有限公司, 辽宁 沈阳 110168;

2. 国家电网东北电力调度控制中心, 辽宁 沈阳 110180;

3. 沈阳农业大学 信息与电气工程学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘要: 为了解决区域电网受风光机组出力的不确定因素影响的调度优化问题, 提出了含风光机组在内的多电源多目标调度优化模型, 目标函数中考虑了经济运行成本及环境治理成本, 同时增加了备用容量和爬坡能力等约束。考虑权系数对多目标优化结果的影响, 基于不同的负荷情况, 对多目标优化的权系数进行动态选取, 得到各阶段负荷下对应的权系数。该文将负荷分为基荷、腰荷及峰荷三种情况, 根据模糊综合评价法对各种负荷情况动态确定权系数, 以此提出四种优化方案。为了降低综合成本, 在考虑了各种约束的前提下, 利用改进的粒子群算法求解模型, 求得四种方案下的分时段综合成本, 并确定调度优化方案, 同时得到运行周期内区域电网中机组出力的最佳策略, 最后通过实例验证了所提基于动态权系数的多目标调度优化策略的有效性。

关键词: 区域电网; 调度优化; 风光机组; 权系数

中图分类号: TM734 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)07-0081-08

doi: 10.12177/emca.2023.069

Multi-Objective Scheduling Optimization Strategy of Regional Power Grid Considering the Influence of Weighting Factors*

WU Xin¹, CAO Shuai¹, AN Tianyu², ZHENG Fangfang³

(1. Shenyang Institute of Computing Technology Co., Ltd., Chinese Academy of Sciences,
Shenyang 110168, China;

2. State Grid Northeast Electric Power Control Center, Shenyang 110180, China;

3. School of Information and Electrical Engineering, Shenyang Agricultural University,
Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: The output of wind and solar power units is uncertain, which will affect the dispatching optimization of regional power grid. To solve this problem, a multi-source multi-objective scheduling optimization model including wind and solar power units is proposed. The objective function takes into account the economic operation cost and environmental treatment cost, and at the same time, the constraints such as reserve capacity and climbing ability increase. Considering the influence of weighting factors on the multi-objective optimization results, based on different load conditions, the multi-objective optimization weighting factors are dynamically selected, and the corresponding

收稿日期: 2023-03-02; 收到修改稿日期: 2023-03-28

* 基金项目: 沈阳市科学技术计划项目(22-322-3-26)

作者简介: 吴鑫(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力调控控制。

曹帅(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力调控控制。

安天瑜(1976—), 男, 博士研究生, 研究方向为电网调度自动化。

weighting factors under different load stages are obtained. The load is divided into three situations: base load, waist load and peak load. According to the fuzzy comprehensive evaluation method, the weighting factors of each middle load situation are dynamically determined, and four optimization schemes are proposed. In order to reduce the comprehensive cost, under the premise of considering various constraints, an improved particle swarm optimization algorithm was used to solve the model, obtains the comprehensive cost of four schemes in different periods, determines the scheduling optimization scheme. At the same time, the optimal strategy for unit output in the regional power grid during the operation period was obtained. Finally, the effectiveness of the proposed multi-objective scheduling optimization strategy based on dynamic weighting factors was verified by an example.

Key words: regional power grid; scheduling optimization; wind and solar power unit; weighting factor

0 引言

随着环境和能源问题的双重压力,国家对节能减排的重视加强,越来越多的风光等可再生能源发展起来并接入区域电网中^[1-2]。风光机组出力的不确定性,对区域电网的调度产生了极大的挑战^[3-5]。

国内外学者们在改善区域电网的调度优化策略方面取得了一些成果。文献[6]以未能消纳的风电功率最小和煤耗量最小为目标函数,建立了含风电场的多目标实时调度模型,但在模型中并未考虑各个机组的排放污染因素。文献[7]建立了含电动汽车的区域电网两个阶段的优化调度模型,第一阶段以负荷峰谷差最小为目标进行优化,第二阶段以电动汽车充电费用最小为目标进行优化,但未在模型中考虑储能装置。文献[8]以总成本为目标函数,研究了考虑风电不确定性的多区域电网的分布鲁棒经济调度优化方法。文献[9]通过建立多目标数学模型,最大限度地提高煤耗效率和发电量,同时降低耗水量,解决新能源并网后的电网调度问题,为加强资源利用作出了重大贡献。文献[10]以目标发电计划和电力偏差最小为目标,制定了一个区域电网环境多目标优化的经济指导模型,同时考虑到各省之间的能源平衡,使用准静态规划算法进行计算,通过排序函数对多个目标进行优化。文献[11]提出了移动邻域搜索算法对负荷波动频繁的区域平滑化的方法,建立了电网调峰多目标函数,但调度模式并未突破或改进。文献[12]侧重于弹性负荷,以燃料成本最低、污染物排放总量最少等作为多目标函数,考虑了可再生能源使用、电网损耗和用户的满意程度等问题,但弹性负载情况有限。多目标优化是对多个指标同时进行优化,相对于单目标,

其考虑得较全面。而多目标权系数代表给予各目标函数相应的重要性,权系数的取值会直接影响优化结果,在负荷不同的运行情况下,权系数取值应不同^[13]。对于含风光等新能源的区域电网多目标调度的优化,仍需进行进一步研究。

针对含风光的区域电网调度优化问题,本文提出一种区域电网动态确定权系数的多目标调度优化模型,以完全消纳风电、光伏和降低区域电网运行的综合成本为目标,然后利用改进的粒子群算法对模型进行求解,得到各时段的机组出力情况。

1 区域电网多目标调度优化模型

电网调度优化模型一般包括风电机组、光电机组、火电机组、燃料电池以及储能装置等部分,在进行调度的优化时,需要考虑其经济运行成本,同时还要考虑对环境带来的影响,即需考虑治理环境的成本。由于电网调度优化步骤中包括风电及光电机组,二者受部分不确定性因素制约,因此可能会影响电网的稳定性,而调度优化(SO)是确保电网稳定、安全运行的重要环节。

1.1 目标函数的建立

SO的目标是合理地规划各个机组的出力,在满足系统稳定性的前提下,提高新能源的利用率,其本质上是一个多目标优化领域问题^[14]。本文以实现电网的综合成本 F 最低为目标函数,其表达式如下:

$$\min F = f_1 F_1 + f_2 F_2 \quad (1)$$

式中: F_1 为经济运行成本; F_2 为环境保护成本; f_1 和 f_2 分别为 F_1 、 F_2 的权系数,并且满足 $f_1 + f_2 = 1$ 。

1.1.1 经济运行的成本 F_1

经济运行的成本 F_1 包括各个机组燃料的成本和运行维护成本^[15],即:

$$F_1 = C_f + C_m \quad (2)$$

考虑到光伏和风力是清洁能源,故其燃料成本为零,本文中燃料成本 C_f 即为火发电机组的燃料成本^[16-18],其表达式如下:

$$C_f = a_1 + a_2 P_{Dg} + a_3 P_{Dg}^2 \quad (3)$$

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 为燃料成本系数; P_{Dg} 为机组的输出功率。

机组的运行维护成本 C_m 表达式如下:

$$C_m = \sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^I \xi_j P_i(t) \quad (4)$$

式中: ξ_j 为比例系数; P_i 为第 i 个机组的发电功率。

1.1.2 环境保护成本 F_2

环境保护成本由火电机组发电产生^[14],具体表达式如下:

$$F_2 = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^{24} \alpha \beta P_{Dg}(t) \quad (5)$$

式中: J 为火电站总数; α 为单位污染物治理成本; β 为污染物去除率。

调度优化目标是以给环境带来的污染最小、经济运行成本最低为目标,即污染物的排放成本最低,同时保障系统运行的经济性及环保性。

1.2 约束条件

1.2.1 等式约束条件

(1) 电力供需平衡约束也就是所有电站的出力之和与系统所需负荷相等^[14],即:

$$\sum_{i=1}^I P_i(t) + P_{es}(t) + P_{loss}(t) = P_L(t) \quad (6)$$

式中: $P_i(t)$ 为第 i 台机组在 t 时刻的发电容量; $P_{es}(t)$ 为储能系统在 t 时刻的输出功率,充电时取正值,放电时取负; $P_{loss}(t)$ 为 t 时刻的网损; $P_L(t)$ 为 t 时刻的负荷功率。

(2) 备用容量约束即所有电站提供的负荷,事故备用容量分别与其对应的总需求值相等。即:

$$\begin{cases} L_n = \sum_{i=1}^I L_{i,n} \\ V_n = \sum_{i=1}^I V_{i,n} \end{cases} \quad (7)$$

式中: L_n 为 n 月份系统负荷需求值; V_n 为 n 月份系统事故备用容量; $L_{i,n}$ 为 n 月份系统中电站 i 承担的负荷容量; $V_{i,n}$ 为 n 月份系统中电站 i 的事故

备用容量。

(3) 各机组检修约束即系统中各机组一年仅检修一次。即有:

$$\sum_{m=1}^M U_{i,m} = 1 \quad (8)$$

式中: $U_{i,m}$ 为第 i 个机组 m 月的检修状态。

$U_{i,m}=0$ 时为未检修状态; $U_{i,m}=1$ 时表示检修状态。

1.2.2 不等式约束条件

(1) 各电站出力约束,对于 $P_i(t)$,有:

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

式中: $P_i^{\min}$ 、 $P_i^{\max}$ 分别为第 i 台机组出力的最大值、最小值。

对于 $P_{es}(t)$,有:

$$P_{es}^{\min} \leq P_{es}(t) \leq P_{es}^{\max} \quad (10)$$

式中: $P_{es}^{\min}$ 、 $P_{es}^{\max}$ 分别为储能装置充放电功率的最大值、最小值。

(2) 爬坡约束:爬坡能力是指网络能够在 5~15 min 的时间范围内应对系统中的持续干扰,如净负荷波动和不确定性。在调度中,爬坡也应满足一定约束条件,即:

$$\begin{aligned} R_{i,\text{down}} t_1 &\leq (P_{i,t} + \Delta P_{i,t}) - \\ &(P_{i,t-1} + \Delta P_{i,t-1}) \leq R_{i,\text{up}} t_1 \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $R_{i,\text{down}}$ 、 $R_{i,\text{up}}$ 分别为第 i 个电厂向下和向上的爬坡速率; t_1 为一个运行时段。

2 调度优化方案

本文依据临界值将负荷曲线划分为基荷,腰荷及峰荷三部分,其中,临界值的计算式如下:

$$\begin{cases} C_{r,1} = \min \Delta L_D \\ C_{r,2} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $C_{r,1}$ 为基荷与腰荷的临界值; $C_{r,2}$ 为腰荷与峰荷的临界值; ΔL_D 为日前 24 h 负荷数据; P_i 为第 i 个采样点的负荷功率; n 表示采样点个数。

负荷功率若在 $C_{r,1}$ 以下,则为基荷;若在 $C_{r,1}$ 与 $C_{r,2}$ 之间,则为腰荷;若在 $C_{r,2}$ 以上,则为峰荷。

多目标函数中的权系数会影响到各目标函数的占比。对于负荷变化明显的时段,若采用固定的权系数,则会影响 SO 的结果。为了使优化效

果更好、更符合各阶段负荷的运行状况,本文采用模糊综合评价法来动态地确定基荷、腰荷及峰荷三种负荷情况下目标函数 F 的权系数^[20],以此确立关于权系数的四种方案。利用数据的归一化,权系数计算式如下:

$$f_n = \frac{f'_n}{\sum_{n=1}^2 f'_n} \quad (13)$$

式中: f'_n 为超标加权值。

f'_n 的计算式为

$$f'_n = \frac{C_n}{C_{an,n}} \quad (14)$$

式中: C_n 为第 n 个因子的实际值, $n=1, 2$; $C_{an,n}$ 为第 n 个因子的最大允许值。

本文中基荷、腰荷、峰荷这三种负荷情况下, C_1 分别取各情况下经济运行成本的平均值, $C_{an,1}$ 取各情况下经济运行成本的最大值; C_2 分别取各情况下环境治理成本的平均值, $C_{an,2}$ 取各情况下环境治理成本的最大值。

3 数学模型的求解方法

对于本文所建模型求解采用的是粒子群算法 (PSO), 在 PSO 中, 所有粒子均是空间解决方案的一个单一候选解, 采用了定位研究的速度模型。速度更新公式如下^[21]:

$$V_{i,d}^{t+1} = WV_{i,d}^t + r_1 c_1 (P_{i,d}^t - x_{i,d}^t) + r_2 c_2 (G_{i,d}^t - x_{i,d}^t) \quad (15)$$

式中: $V_{i,d}^t$ 为第 t 次迭代时第 i 个粒子的速度; r_1, r_2 分别表示均匀分布在 $(0, 1)$ 内的随机数; c_1 为自我学习因子; c_2 为全局学习因子; W 为惯性权系数。

位置更新公式如下^[22]:

$$X_{i,d}^{t+1} = X_{i,d}^t + V_{i,d}^{t+1} \quad (16)$$

式中: $X_{i,d}^t$ 为第 t 次迭代时第 i 个粒子的位置。

本文对传统的 PSO 算法加以改进, 考虑电力系统的安全性, 赋予各个机组出力约束条件, 来计算各时刻的运行费用。算法流程如图 1 所示。

4 算例分析

4.1 算例基本数据

选取某地区电网 2020 年某日 12:30 至次日 12:30 的运行情况进行分析, 其总负荷如图 2 所

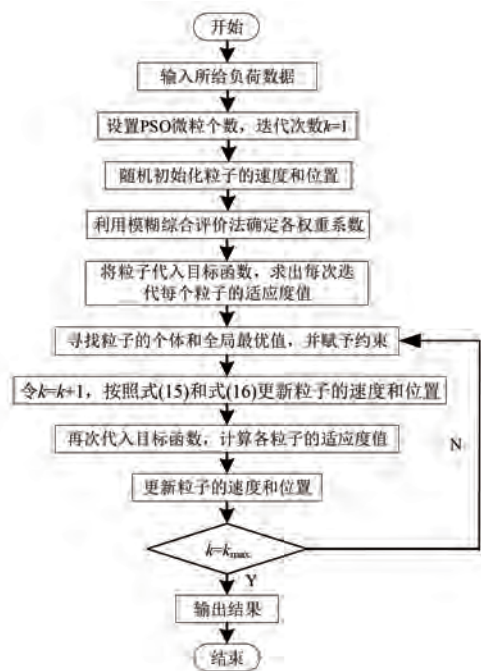


图 1 算法流程图

示。该区域电网中机组包括风电机组 (WT)、光伏机组 (PV)、燃料电池 (FC)、火电机组 (TP)、可中断负荷 (DL) 及储能设备 (ES) 等。火电机组的最大出力设置为 50 MW, 最小出力设置为 5 MW, 爬坡功率不能高于 10 MW, 不能低于 -5 MW; 燃料电池的最大出力设置为 45 MW, 爬坡功率不能高于 2 MW, 不能低于 -2 MW; 储能装置的最大出力设置为 20 MW, 最小出力限值为 -20 MW, 电储能的自放电率为 0.001。采用本文提出的基于 PSO 算法的改进调度优化 (SO) 策略对该算例 1 天 24 h 的配电网进行调度优化来验证本文方法及模型的有效性。

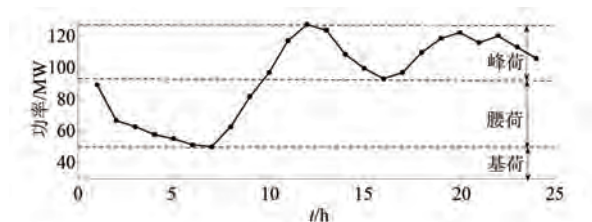


图 2 总负荷曲线

从图 2 可以看出, 在 10:00-15:00 及 18:00-24:00 期间为用电高峰期, 在 3:00-8:00 期间为用电低谷期, 剩余时间为用电平淡期。该地区一

天 24 h 光伏发电出力数据和风力发电出力数据分别见表 1 和表 2。

表 1 光伏发电出力数据 MW			
00:00~06:00	07:00~12:00	13:00~18:00	19:00~24:00
0.00	0.00	28.96	11.32
0.00	0.00	30.20	2.50
0.00	2.52	28.96	0.00
0.00	10.08	26.46	0.00
0.00	16.38	21.42	0.00
0.00	25.20	16.38	0.00

表 2 风力发电出力数据 MW			
00:00~06:00	07:00~12:00	13:00~18:00	19:00~24:00
30.24	35.28	7.55	34.02
39.05	15.12	11.35	18.90
32.76	17.64	6.30	22.68
37.81	21.42	5.04	18.90
41.57	25.20	17.64	20.15
39.06	15.12	21.41	20.15

4.2 基于 PSO 算法的调度优化结果分析

在本算例中,种群规模设为 200,惯性权重比例 w 设为 1,惯性权重阻尼比 w_{damp} 设为 0.98,算法迭代次数最大值设为 100,个体学习因数 c_1 和全局学习因数 c_2 分别设为 1.5 和 2.0,应用 MATLAB 对模型进行求解。基荷、腰荷、峰荷三种负荷情况下的 C_n 、 $C_{an,n}$ 见表 3。

表 3 三种负荷下实际值及最大允许值数据 元			
名称	基荷情况	腰荷情况	峰荷情况
实际值 C_1	3 761.32	4 141.78	7 199.95
实际值 C_2	122.36	296.38	851.73
最大允许值 $C_{an,1}$	3 761.32	5 116.88	7 539.97
最大允许值 $C_{an,2}$	122.36	565.07	1127.61

根据式(14)可计算出基荷、腰荷及峰荷下的超标加权值,见表 4。

表 4 三种负荷下超标加权值数据			
超标加权值	基荷	腰荷	峰荷
f_1	1	0.809 4	0.954 9
f_2	1	0.524 5	0.755 3

再根据式(13)归一化,则可得各负荷情况下的权系数,根据权系数确立以下四种方案:

- 方案 1: $f_1=0.5, f_2=0.5$ 。
- 方案 2: $f_1=0.606\ 8, f_2=0.393\ 2$ 。
- 方案 3: $f_1=0.558\ 4, f_2=0.441\ 6$ 。
- 方案 4: 基荷部分权系数为 $f_1=0.5, f_2=0.5$; 腰荷部分权系数为 $f_1=0.606\ 8, f_2=0.393\ 2$; 峰荷部分权系数为 $f_1=0.558\ 4, f_2=0.441\ 6$ 。

风力发电与光伏发电出力分别如图 3 和图 4 所示。

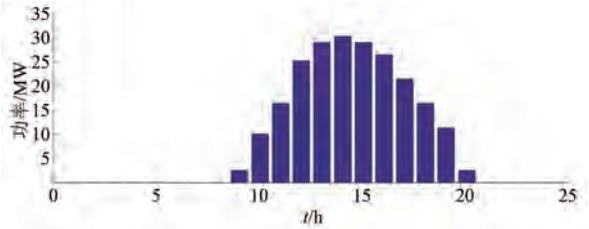


图 3 光伏发电出力

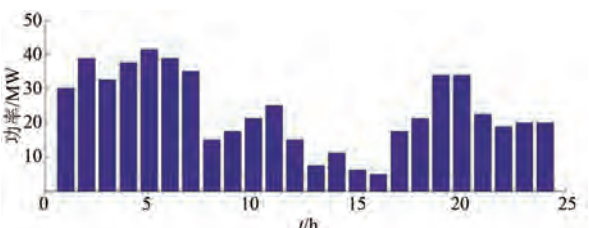


图 4 风力发电出力

从上图 3~图 4 可以看出, PV 在 10:00~15:00 时间段出力最多,因为这个期间内的光照强度较足,而 WT 在这个时间段内出力较少,在早晚时刻出力较多。改进 PSO 算法和上述的四种方案结合,得出各个机组计划优化结果图,如图 5~图 8 所示。

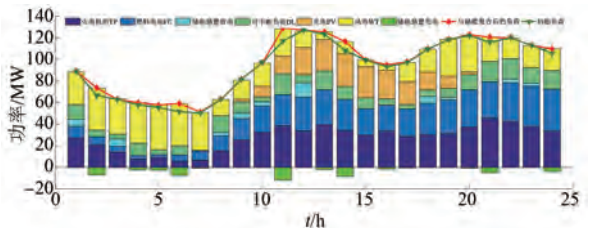


图 5 方案 1 对应的各机组计划优化结果图

可以观察到,在相同的调度优化策略下,当目标函数中的权系数发生变化时,也可能导致优化

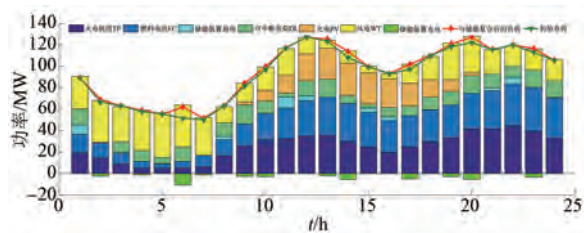


图6 方案2对应的各机组计划优化结果图

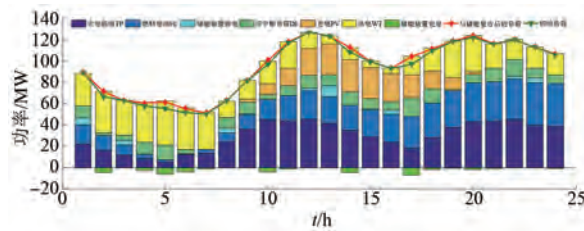


图7 方案3对应的各机组计划优化结果图

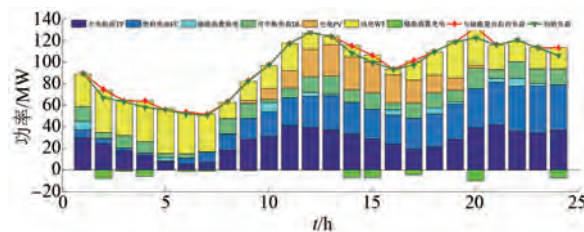


图8 方案4对应的各机组计划优化结果图

结果的差异及每个单元贡献的不同,因此在研究网络中的调度优化问题时,应适当考虑到多目标函数的重要性,并给予合理的占比。由于WT与PV属于可再生能源发电,并且其分别受风速和光照强度的影响,所以在调度优化策略中,会优先利用这二者,当二者提供的电能不足以满足负荷需求时,再利用其他的分布式单元及ES向负荷供电。根据图5可知,在用电高峰期,先由PV及WT出力,如果不足,则看TP的出力成本,比如在1:00、3:00、12:00时刻TP出力更贵,ES放电,TP则少出力;在11:00、14:00时刻TP出力便宜,ES多充电储存,可用于下次放电。若还不足以满足用电需求,则选择给部分不重要的负荷停电以降低用电即DL出力;而在负荷低谷时段,主要是由WT出力,此时WT已经大多能够满足需求,而不选择PV出力,是因为该期间温度较低,PV出力也会降低,若此时WT供电多于负荷所需,则将剩余的电能供给ES充电。系统采用分时段调度调

整各发电单元的出力,四种方案下的出力图分别见图9~图12所示。

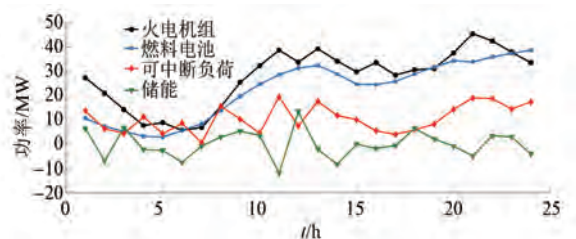


图9 方案1对应的各模型出力图

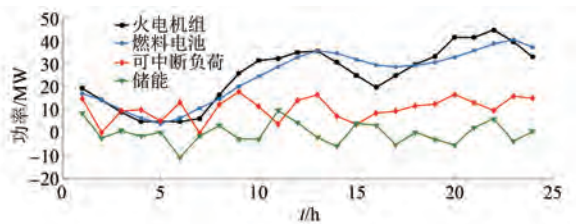


图10 方案2对应的各模型出力图

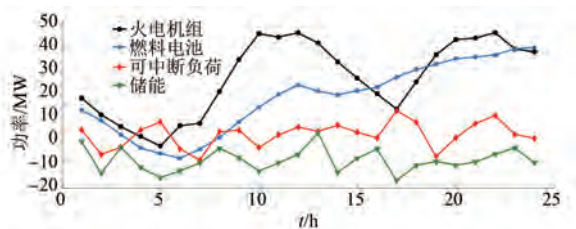


图11 方案3对应的各模型出力图

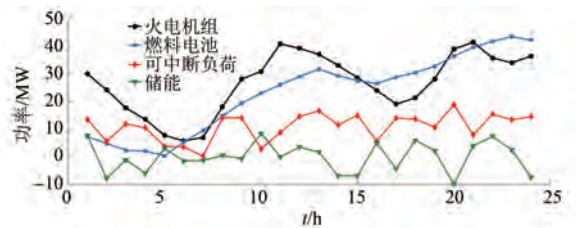


图12 方案4对应的各模型出力图

根据1.1节中的目标函数,可以计算出四种方案下各个时刻的综合成本,分别见图13~图16。各种方案运行的总成本见表5。

通过本文改进PSO从而对四种方案下的模型进行求解,基于结果可知,在方案4情况下,即在基荷、腰荷、峰荷情况下采用其各自的权系数时,系统总体运行的经济成本最低,优化的效果最好。在对多目标权系数进行动态确定后,可以一

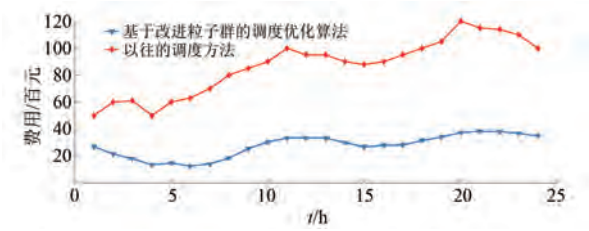


图 13 方案 1 对应的各时刻总成本图

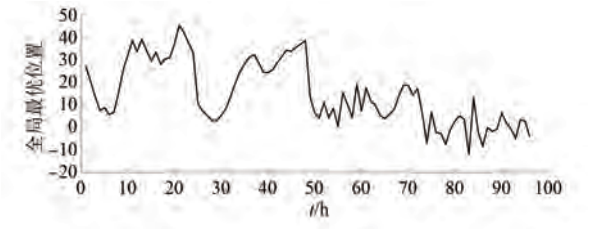


图 17 方案 1 对应的全局最优位置图

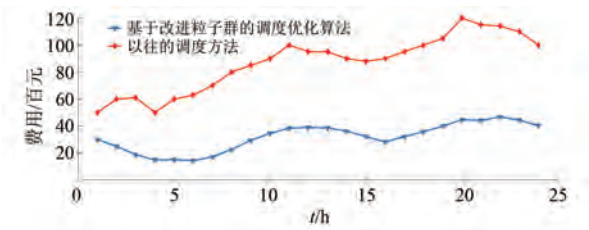


图 14 方案 2 对应的各时刻总成本图

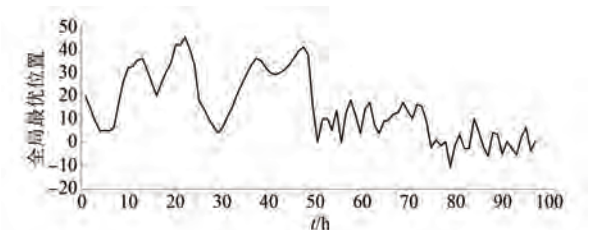


图 18 方案 2 对应的全局最优位置图

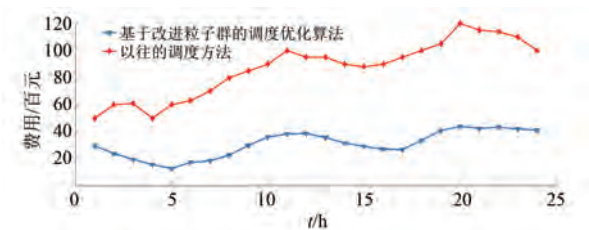


图 15 方案 3 对应的各时刻总成本图

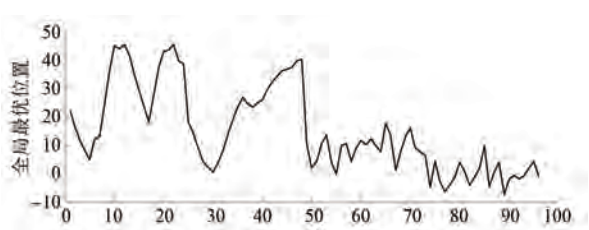


图 19 方案 3 对应的全局最优位置图

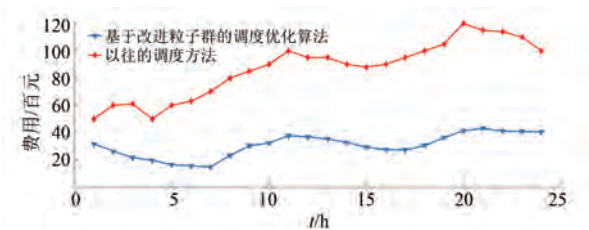


图 16 方案 4 对应的各时刻总成本图

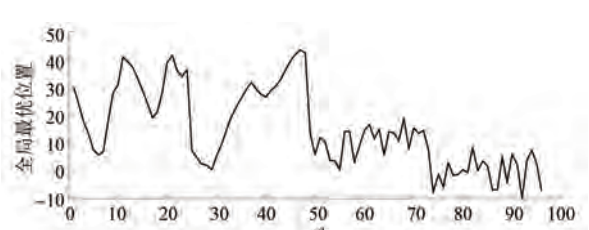


图 20 方案 4 对应的全局最优位置图

定程度降低成本,从而达到调度优化的目的。优化调度能满足既定目标和约束条件。四种方案下,经改进后 PSO 各次迭代过程中,全局最优位置曲线图分别见图 17~图 20。

表 5 各方案下最优成本 元

方案	总成本
方案 1	666 647.32
方案 2	797 004.90
方案 3	822 918.01
方案 4	638 061.04

5 结 语

研究含风光机组的有源区域电网的多目标调度优化策略对整个电网的运行控制起着极其重要的作用,可以提高系统的安全性和稳定性。

(1) 建立多目标调度优化(SO)模型时,以含经济成本和环境治理成本在内的综合成本最低为多目标函数,综合考虑了平衡约束、出力约束、爬坡约束等多个条件,相对于单目标优化考虑得更全面,更符合实际电网的运行状况。

(2) 多目标权系数会影响调度优化结果,在负荷的不同阶段,权系数的选取应不同。本文将负荷分为基荷、腰荷及峰荷三个部分,采用模糊综合评价法分别对三种负荷下的权系数进行动态确定,然后对区域电网调度进行分时段优化。可以发现在动态确定权系数后,能够使综合成本更低,优化的效果更好,对实际电网的运行具有指导意义。

【参考文献】

- [1] PANDEY A K, JADOUN V K, JAYALAKSHNI N S. Real-time and day-ahead risk averse multi-objective operational scheduling of virtual power plant using modified Harris Hawk's optimization [J]. Electric Power Systems Research, 2023, 220: 109285.
- [2] ALI S, ULLAH K, HAFEEZ G, et al. Solving day-ahead scheduling problem with multi-objective energy optimization for demand side management in smart grid [J]. Engineering Science and Technology, 2022, 36: 101135.
- [3] 赵文会, 祁宇, 范韩璐. 区域电网的主从博弈调度 [J]. 控制理论与应用, 2018, 35(5): 644.
- [4] 张建文, 刘国亮, 刘铭洋. 风电提供柔性爬坡容量的电力系统优化调度 [J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 414.
- [5] 田浩, 王可庆, 俞斌, 等. 考虑多类型负荷及风光不确定性的配电网优化规划 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(9): 144.
- [6] 王魁, 张步涵, 周杨, 等. 基于混沌量子粒子群算法的含风电场电力系统实时调度 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 141.
- [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.
- [8] 李运龙, 李志刚, 郑杰辉. 考虑风电不确定性和相关性的多区域电网分布鲁棒经济调度 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 97.
- [9] 何照胜, 李晓明. 一种环保节约型的短期联合发电调度 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(6): 800.
- [10] 张银芽, 侯依昕, 胡婷, 等. 考虑省间电力平衡的区域电网环境经济优化调度 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(4): 548.
- [11] 孟庆喜, 申建建, 程春田, 等. 多电网调峰负荷分配问题的目标函数选取与求解 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3683.
- [12] 杨家然, 王兴成, 隋林涛, 等. 采用混合智能算法的含风电电力系统多目标优化调度 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 21.
- [13] 孟晓芳, 王立地, 王小宁, 等. 利用分布式电源改善三相四线低压配电网运行特性方法 [J]. 电网技术, 2018, 42(12): 4091.
- [14] 孙成富, 周海岩, 张亚红. 基于差分进化算法的动态环境经济电力系统调度优化 [J]. 计算机科学, 2012, 39(11): 208.
- [15] 张涛, 郭玥彤, 李逸鸿, 等. 计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 52.
- [16] 袁泉, 姚海成, 周毓敏, 等. 面向节能发电调度的电力系统多目标优化调度模型 [J]. 自动化技术与应用, 2020, 39(4): 99.
- [17] 刘德伟, 郭剑波, 黄越辉, 等. 基于风电功率概率预测和运行风险约束的含风电场电力系统动态经济调度 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 9.
- [18] 剡文林, 陈凯, 尹成全, 等. 考虑大规模风光消纳的多目标优化调度关键技术 [J]. 可再生能源, 2019, 37(6): 893.
- [19] 李铁, 李正文, 杨俊友, 等. 计及调峰主动性的风光水火储多能系统互补协调优化调度 [J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3622.
- [20] 曹炳元. 应用模糊数学与系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [21] ZHENG F F, MENG X F, WANG L D, et al. Operation optimization method of distribution network with wind turbine and photovoltaic considering clustering and energy storage [J]. Sustainability, 2023, 15: 2184.
- [22] ZHENG F, MENG X, WANG L, et al. Power flow optimization strategy of distribution network with source and load storage considering period clustering [J]. Sustainability, 2023, 15: 4515.