

文章编号: 1006-4710(2015)02-0242-06

风火联合系统的多目标随机优化调度方法的研究

黄亭¹, 贾嵘¹, 李臻², 董开松², 杨俊²

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 甘肃电力科学研究所, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 考虑到风电场出力的随机性, 以常规机组燃煤费用最小、污染气体排放量最小为目标函数, 约束条件以概率的形式表示, 构建考虑机组组合的风火联合系统的多目标随机机会约束规划模型。结合机组启停优先顺序表, 采用启发式搜索策略确定机组组合状态, 以避免机组频繁启停或系统容量冗余。采用基于 Pareto 的多目标粒子群优化算法, 结合随机模拟技术和模糊逻辑评价法, 对既定机组进行经济负荷分配。以含 10 机的风火联合系统为算例, 验证了所提调度方法的可行性、有效性。优化调度结果表明: ①该模型能够充分利用清洁能源, 降低系统运行成本, 减少污染气体排放量, 提高电力系统运行的综合效益; ②该算法计算精度高, 速度快, 避免了基本粒子群优化算法易陷入局部最优的缺点。

关键词: 风电场; 多目标随机机会约束规划; 优先顺序表; 多目标粒子群优化; 随机模拟

中图分类号: TM614

文献标志码: A

Research on multi-objective stochastic optimal dispatching method of wind-thermo combined power system

HUANG Ting¹, JIA Rong¹, LI Zhen², DONG Kaisong², YANG Jun²

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Due to the randomness of wind farms power, a multi-objective stochastic chance constrained programming model of wind-thermo combined system considering unit commitment is presented, minimizing both the fuel cost and emission of polluted gas of thermal generators as objective functions and expressing constraining conditions by probability. In order to avoid frequent starting and shutting of generating set or the system capacity redundancy, a heuristic search tactic combined with the priority list of generating set start and stop is applied to determine the unit commitment states. The multi-objective particle swarm optimization algorithm based on Pareto combined with fuzzy logic evaluation method and stochastic simulation technique is adopted to carry out the economic load distribution for the given generating set. The calculation examples of 10 generating sets wind-thermo combined system are used to verify the feasibility and effectiveness of the suggested dispatching method. The optimized dispatching results indicate: ①This model is able to make full use of clean energy, to lower the operation cost of the system, to reduce amount of emission of polluted gas and to improve the comprehensive benefits of power system operation; ②This algorithm is of high calculation accuracy and fast speed so as to avoid the disadvantages of the basic particle swarm optimization algorithm that is easy to fall into local optimum.

Key words: wind farms; multi-objective stochastic chance constrained programming; priority list; multi-objective particle swarm optimization; stochastic simulation

随着风电并网规模的不断扩大, 风电场在参与调度计划节省燃料成本降低排放量的同时, 间接地造成常规机组所承担的负荷波动范围变大, 这将需

要系统额外预留一部分旋转备用容量来确保供电的可靠性, 必然又将提高燃煤机组的发电成本。因此, 需要建立可靠、灵活、经济、环保的电力系统调度模

收稿日期: 2014-08-10

基金项目: 国网甘肃省电力公司科技项目(2013103014, 2013103018)。

作者简介: 黄亭, 女, 硕士生, 研究方向为含风电场电力系统的动态经济优化调度。E-mail: 15191587139@163.com。

通讯作者: 贾嵘, 男, 教授, 博导, 研究方向为电力系统自动化与控制。E-mail: 13310985258@163.com。

型,对系统的发电调度计划做出相应的调整。

文献[1]~[3]通过增加备用容量来处理风电随机波动特性,建立了含风电电力系统的确定性经济调度模型,但为了保证系统绝对安全,往往会牺牲运行的经济性。文献[4]和[5]建立了含风电电力系统的不确定性经济调度模型,但却未考虑机组的环境效益,没有体现风电的价值。文献[6]从风险的角度量化风电随机性因素对系统的影响,然而风险指标建立的准确度影响所建模型的准确性。文献[7]和[8]在求解多目标优化模型时,均是多目标优化问题转化为单目标优化问题来求解,这种方法依赖个人偏好,主观因素过多,往往会丢失很多有用的信息,无法客观的综合评估经济效益和环境效益。文献[9]提出了帕累托(Pareto)最优解集的概念,但是优化调度中没有考虑不同时间断面之间的耦合性,不符合实际调度情况。

本文建立了考虑机组组合的风火联合系统的双目标随机优化调度模型,对于含随机变量的不等式约束条件以概率的形式来表达。在求解模型时首先根据机组的经济性指标对机组进行启停优先顺序排序,结合机组启停优先顺序表,采用启发式搜索策略确定机组的启停状态,最后采用 MOPSO(multi-objective particle swarm optimization)算法对既定机组进行经济负荷分配,得到 Pareto 非劣解集后,采用模糊逻辑评价法在 Pareto 最优解集中选取最优非劣解。在含 10 机的风火联合系统上验证了所建立模型的正确性以及算法有效性和收敛性。

1 风机输出功率特性

1.1 风机输出功率

P_w 为风机出力, v 为风机轮毂高度处风速,两者之间的数学关系如下式^[4]:

$$P_w = \begin{cases} 0, & 0 \leq v < v_{Cl} \text{ 或 } v > v_{Co} \\ \frac{P_{WR}}{v_R^3 - v_{Cl}^3} v^3 - \frac{v_{Cl}^3}{v_R^3 - v_{Cl}^3} P_{WR}, & v_{Cl} \leq v < v_R \\ P_{WR}, & v_R \leq v \leq v_{Co} \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_{WR} 为风机的额定功率, v_R 为额定风速, v_{Cl} 为切入风速, v_{Co} 为切出风速^[4]。

1.2 风速和风机出力的概率分布

风速的不断变化导致风机出力的随机变化,因此,通过分析风速变化的规律可以研究风机出力的随机变化规律。研究表明,短期风速概率特性多用正态分布描述,则其概率密度函数为^[5]:

$$f(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \exp\left[-\frac{(v-\mu)^2}{2\sigma_v^2}\right] \quad (2)$$

式中, μ 为平均风速, σ_v 为标准差^[5]。

针对风功率预测的不准确性,风电场出力可以用下式表示:

$$P_{wt} = P_{ft} + \delta_{wt} \quad (3)$$

式中, P_{wt} 为风电场在 t 时刻的实际出力, P_{ft} 为该时刻的风电场预测出力, δ_{wt} 为该时刻的风电场预测出力随机偏差量,根据文献[10]的研究,该偏差量服从均值为 0、标准差为 σ_{wt} 的正态分布,该标准差由下式计算:

$$\sigma_{wt} = \frac{1}{5} P_{ft} + \frac{1}{50} N_w \cdot P_{WR} \quad (4)$$

式中, N_w 为风电机组台数。

2 风火联合系统的多目标随机优化调度模型

2.1 多目标随机机会约束规划

约束条件中含有随机变量的问题通常可以通过机会约束规划来解决,这种决策常常需要在观察到随机变量的实现之前做出。具有 m 个极小化目标函数的多目标机会约束规划的一种常见形式为:

$$\begin{cases} \min[F_1, \dots, F_m] \\ \text{s. t. } P_r\{g_j(x, \xi) \leq 0, j = 1, 2, \dots, n\} \geq \lambda_j \end{cases} \quad (5)$$

式中, x 为决策变量; ξ 为随机变量; $P_r\{\cdot\}$ 表示 $\{\cdot\}$ 中事件成立的概率; $g_j(x, \xi)$ 为随机约束函数; n 表示随机约束条件个数; λ_j 为事先给定的约束条件的置信水平。

2.2 目标函数

1) 常规机组总的燃煤费用优化模型

$$\min F_1 = \min\left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^G (f_{git}(P_{git}) + (1 - U_{git-1})S_{git})U_{git}\right] \quad (6)$$

式中, F_1 表示 T 小时内, G 台燃煤机组总的燃煤费用; T 为调度周期内的小时数; G 为参与优化的常规机组台数; i 为机组的序号; P_{git} 为机组 i 在 t 时段的出力; U_{git} 为机组 i 在 t 时段的运行状态, U_{git-1} 为机组 i 在 $t-1$ 时段的运行状态, U_{git} 、 U_{git-1} 为 1 表示运行, U_{git} 、 U_{git-1} 为 0 表示停机; S_{git} 为机组 i 在 t 时段的启动耗能,它与停机时间 τ_i 的长短有关, S_{git} 一般用下式表示:

$$S_{git} = \delta_i + \sigma_i(1 - e^{-\tau_i^{off}/\tau_i}) \quad (7)$$

式中, δ_i 、 σ_i 、 τ_i 为机组 i 的启动成本系数; T_{git}^{off} 为机组 i 在 t 时段停运的时间。

$f_{git}(P_{git})$ 为常规机组 i 在 t 时段的运行耗能,其表达式为^[10]:

$$f_{git}(P_{git}) = a_i + b_i P_{git} + c_i P_{git}^2 \quad (8)$$

式中, a_i, b_i, c_i 为燃煤机组 i 运行耗能系数。

2) T 时间段内, G 台机组总的环境效益优化模型

$$\min F_2 = \min \left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^G E_{git}(P_{git}) U_{git} \right] \quad (9)$$

式中, F_2 表示 T 小时内, G 台燃煤机组总的污染气体排放量; $E_{git}(P_{git})$ 为机组 i 在 t 时段的污染气体排放量。本文采用了如下污染气体综合排放模型:

$$E_{git}(P_{git}) = \alpha_i + \beta_i P_{git} + \gamma_i P_{git}^2 \quad (10)$$

式中, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 为燃煤机组 i 污染气体排放量系数。

2.3 约束条件

1) 系统功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^G P_{git} U_{git} + P_{wt} = P_{Lt} \quad (11)$$

式中, P_{Lt} 为系统在 t 时段的发电负荷, P_{wt} 为风电场在 t 时段的输出功率。由于 P_{wt} 为随机变量,以概率的形式表示式(11)为:

$$P \left\{ \sum_{i=1}^G P_{git} U_{git} + P_{wt} \geq P_{Lt} \right\} \geq \lambda_1 \quad (12)$$

式中, λ_1 为满足功率平衡约束的置信水平, $P\{\cdot\}$ 表示 $\{\cdot\}$ 中事件成立的概率。

2) 机组约束

$$P_{git}^{\min} \leq P_{git} \leq P_{git}^{\max} \quad (13)$$

式中, P_{git}^{\min} 和 P_{git}^{\max} 分别为机组 i 在 t 时段出力的下限和上限。

3) 系统的正负旋转备用容量约束

① 正旋转备用容量约束为:

$$P \left\{ \sum_{i=1}^G U_{git} P_{git}^{\max} + P_{wt} \geq P_{Lt} (1 + R_{ur}) \right\} \geq \lambda_2 \quad (14)$$

式中, R_{ur} 为系统的正旋转备用率, λ_2 为满足正旋转备用容量约束的置信水平。

② 负旋转备用容量约束为:

$$P \left\{ \sum_{i=1}^G U_{git} P_{git}^{\min} + P_{wt} \leq P_{Lt} (1 - R_{dr}) \right\} \geq \lambda_3 \quad (15)$$

式中, R_{dr} 为系统的负旋转备用率, λ_3 为满足负旋转备用容量约束的置信水平。

4) 机组爬坡速率约束

$$D_{ri} \leq P_{git} - P_{git-1} \leq U_{ri} \quad (16)$$

式中, D_{ri}, U_{ri} 为机组 i 在 t 时段有功出力下降和上升速率, P_{git-1} 为机组 i 在 $t-1$ 时段的出力。

5) 机组启停约束

$$\begin{aligned} (U_{git} - U_{git-1})(T_{git}^{\text{off}} - T_{git}^{\text{off}_{\min}}) &\geq 0, i \in G \\ (U_{git-1} - U_{git})(T_{git}^{\text{on}} - T_{git}^{\text{on}_{\min}}) &\geq 0, i \in G \end{aligned} \quad (17)$$

式中, T_{git}^{off} 和 T_{git}^{on} 分别为机组 i 在 t 时段的停机持续时间和开机持续时间; $T_{git}^{\text{off}_{\min}}, T_{git}^{\text{on}_{\min}}$ 分别为机组 i 在调度周期内的最小连续停运小时数和最小连续运行小时数。

3 多目标机会约束规划模型的求解

本文使用综合随机模拟、优先顺序法、模糊逻辑评价法和多目标粒子群优化算法的混合智能算法求解机会约束规划模型,提高了算法的搜索性能,避免其陷入局部最优解。

3.1 随机模拟技术

利用随机模拟技术来验证式(5)中以概率形式描述的约束条件的步骤如下:

- ①置 $N_1 = 0$;
- ②由 ξ 的概率分布随机生成 N 个样本;
- ③如果满足 $g_j(x, \xi) \leq 0$, 则 $N_1 = N_1 + 1$;
- ④重复步骤③共 N 次;
- ⑤如果 $\frac{N_1}{N} \geq \lambda_j$, 返回“成立”, 否则返回“不成立”。

3.2 多目标优化算法

本文采用优先顺序法进行机组的优化组合求解,采用 MOPSO 算法进行既定机组间负荷分配,算法流程图如图 1。

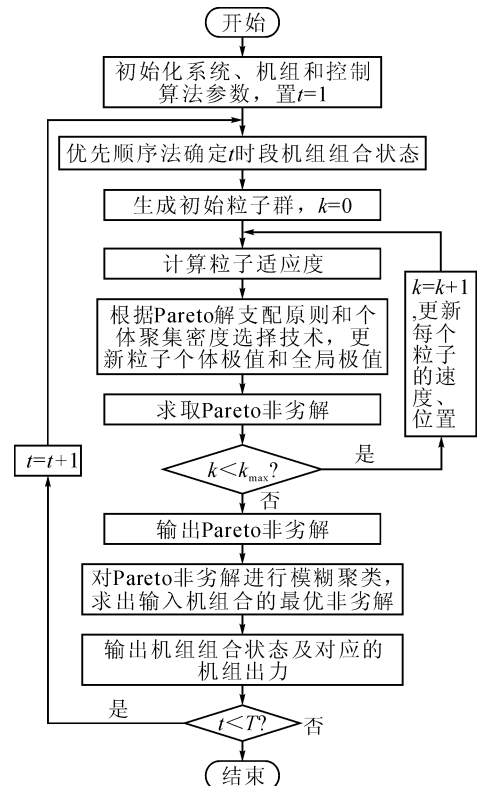


图 1 多目标优化算法流程图
Fig. 1 Flow chart of multi-objective optimization algorithm

在多目标优化问题中,一般无法使各目标同时达到最优,而是得到一组 Pareto 最优解集。对解集空间的任意 2 个解向量 P_1 和 P_2 ,仅当满足以下任意一种情况时,称“ P_1 支配 P_2 ”: $\textcircled{1}P_1$ 和 P_2 都是可行解,且 $F_k(P_1) \leq F_k(P_2), \forall k \in \{1,2,\dots,m\}$ 或 $F_k(P_1) < F_k(P_2), \exists k \in \{1,2,\dots,m\}$ 成立; $\textcircled{2}P_1$ 和 P_2 都是不可行解, P_1 的总体约束违反程度较小; $\textcircled{3}P_1$ 是可行解, P_2 是不可行解。

本文应用基于拥挤距离的个体聚集密度对外部种群的 Pareto 解集进行维护,按照非劣解集中个体拥挤距离大小排序,拥挤距离小者优先被淘汰。最后,采用模糊逻辑评价法帮助电力系统调度运行人员从 Pareto 解集中挑选出最优非劣解。

4 算例分析

4.1 算例描述

本文运用 matlab7.8 编程仿真软件对 10 机系统进行仿真分析。调度周期取 1 天,分成 24 个时段^[10]。假设风电场共有 60 台额定功率为 1 MW 的风机,不考虑风机旋转备用及其强迫停运的可能性,风机全额投网。风电场输出功率预测值见表 1。系统的正负旋转备用率取 5%,常规发电机组参数、各时段负荷需求数据以及常规机组污染排放特性系数见文献[10]。

4.2 方法验证

MOPSO 算法参数设置:种群规模大小取 150,迭代次数取 400。在迭代过程中采用一种逐步递减惯性系数的方式, $\omega = 0.9 \sim 0.4$,学习因子采用常数 $c_1 = c_2 = 2$ 。

1) 在置信度 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0.99$ 情况下,考虑风电场接入对系统 1 时段进行优化调度,通过 MOPSO 算法得到 Pareto 前沿如图 2 所示,得到 Pareto 最优解中极端解和最优非劣解如表 1 所示。经过 MOPSO 获得的 Pareto 前沿分布范围很广,可为经济性和环保性之间的综合评估提供丰富的信息。如表 1 所示:若以经济最优为目标,则总煤耗量成本为 13 426USD,污染物排放量为 5.810 0 t,此方案的满意度为 0.001;若以环保最优为目标,则总煤耗量成本为 13 532 USD,污染物排放量为 5.135 9 t,此方案的满意度为 0.001;在经济性上,前者优于后

者;在环保性上,后者优于前者;采用模糊逻辑评价法在 Pareto 非劣解集中,选取其中满意度最高的一个解,作为最后的最优非劣解。在最优非劣解调度方案中,调度总费用为 13 479USD,高于经济最优却低于环保最优调度方案中的调度总费用;污染物排放量为 5.298 3 t,低于经济最优却高于环保最优调度方案中的污染物排放量,而满意度为 0.012 5,却高于以上两组调度方案对应的满意度。

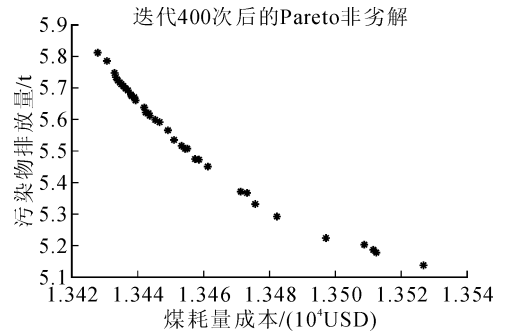


图 2 MOPSO 算法的 Pareto 前沿
Fig. 2 Pareto front of MOPSO

表 1 置信度 0.99 下的 Pareto 最优非劣解和极端解
Tab. 1 Optimal Pareto solutions and extreme solutions under confidence of 0.99

目标函数	煤耗量成本/USD	污染物排放量/t	满意度
经济最优	13 426	5.810 0	0.001
环保最优	13 532	5.135 9	0.001
最优非劣解	13 479	5.298 3	0.012 5

2) 表 2 为在置信度 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0.99$ 下考虑风电接入的日调度优化结果,表 2 的横表头中 1~10 分别对应系统中的 10 台常规机组,机组启停优化结果中的 0 表示此时该机组处于停机状态,1 表示此时该机组处于开机状态。由表 2 中的数据对比分析可以得出:在满足系统负荷需求和安全稳定前提下,风电场的接入,使总机组出力减少了,系统经济性提高了;在负荷较低、风机出力较高的 1~6 时段、21~24 时段,大容量机组的有功出力减少,为系统提供更大容量的旋转备用,而能源消耗大、污染气体排放多的 9、10 机处于停机状态;在负荷较高、风机出力较低的 10~12 时段,经济性好的 1~4 机处于满发状态,小容量机组开启,输出功率在最小出力以上,提高了整个系统的安全稳定性以及经济环保性。

表2 在置信度水平 0.99 下的机组组合日调度优化结果
Tab.2 Daily dispatching optimal solutions of unit commitment under confidence of 0.99

时段	机组启停优化结果	各机组的出力情况/MW										机组总出力/MW	风电功率/MW	负荷功率/MW
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1	1100000000	391.23	294.02	0	0	0	0	0	0	0	0	685.25	32.29	700
2	1100000000	455.00	281.67	0	0	0	0	0	0	0	0	736.67	30.87	750
3	1101100000	414.54	361.67	0	30.00	25.00	0	0	0	0	0	831.21	37.94	850
4	1101100000	455.00	394.12	0	60.00	25.00	0	0	0	0	0	934.12	34.37	950
5	1101100000	455.00	414.15	0	90.00	25.00	0	0	0	0	0	984.15	36.09	1 000
6	1111110000	455.00	430.43	30.00	120.00	25.00	20.00	0	0	0	0	1 080.43	41.64	1 100
7	1111110000	441.50	455.00	60.00	90.00	55.84	24.69	0	0	0	0	1 127.03	50.15	1 150
8	1111110000	455.00	455.00	90.00	120.00	39.39	20.00	0	0	0	0	1 179.39	44.28	1 200
9	1111111110	443.32	455.00	120.00	130.00	69.80	20.00	25.00	10.00	10.00	0	1 283.12	38.46	1 300
10	1111111111	455.00	455.00	130.00	130.00	109.80	45.00	25.00	15.05	10.00	10.00	1 384.85	33.38	1 400
11	1111111111	455.00	455.00	130.00	130.00	149.80	64.14	25.00	10.00	10.00	10.00	1 438.94	25.87	1 450
12	1111111111	455.00	455.00	130.00	130.00	162.00	80.00	25.00	30.00	12.19	10.00	1 489.19	25.01	1 500
13	1111110100	455.00	455.00	130.00	130.00	155.37	55.00	0	10	0	0	1 390.37	22.67	1 400
14	1111110000	455.00	412.48	130.00	130.00	115.37	30.00	0	0	0	0	1 272.84	54.13	1 300
15	1111110000	408.36	405.78	130.00	129.94	75.37	24.68	0	0	0	0	1 174.14	54.00	1 200
16	1111100000	455.00	325.78	100.00	105.09	35.37	0	0	0	0	0	1 021.24	59.29	1 050
17	1111000000	421.59	302.57	130.00	120.71	0	0	0	0	0	0	974.87	53.84	1 000
18	1111100000	455.00	338.41	130.00	130.00	25.00	0	0	0	0	0	1 078.41	45.48	1 100
19	1111111000	431.93	414.53	114.90	110.32	55.70	25.00	25.00	0	0	0	1 177.37	47.61	1 200
20	1111111111	455.00	455.00	130.00	130.00	95.70	50.00	25.00	17.14	10.00	10.00	1 377.84	47.71	1 400
21	1111111000	455.00	450.43	130.00	130.00	55.76	25.00	25.00	0	0	0	1 271.19	59.43	1 300
22	1111100000	419.00	370.43	130.00	130.00	31.24	0	0	0	0	0	1 080.66	41.16	1 100
23	1111100000	362.76	290.43	100.00	100.00	25.00	0	0	0	0	0	878.19	46.22	900
24	1111000000	337.08	212.33	120.05	101.25	0	0	0	0	0	0	770.70	59.12	800

3) 系统在不同置信水平下的调度结果如表 3。

表3 不同置信水平下的优化调度结果
Tab.3 The optimal dispatching solutions under different confidence levels

置信水平	煤耗量成本/USD	污染物排放量/t
0.99	563 394	244.846 1
0.90	557 931	244.207 8
0.80	557 190	242.373 3

表4 文献[10]在不同置信水平下的优化调度结果
Tab.4 The optimal dispatching solutions under different confidence levels in literature[10]

置信水平	煤耗量成本/USD	污染物排放量/t
0.99	574 130	249.86
0.90	563 390	247.46
0.80	559 300	244.83

将表 3 中的优化调度结果和表 4 中的优化调度结果对比可以看出:在同一置信度水平下,本文的优化调度结果更优,例如:在置信度水平 0.8 时,文献[10]得出的调度总费用为 559 300 USD,污染气体排放量 244.83 t,均比本文的高,表明本文提出的算法其搜索性能、计算精度更高。同时,由表 3 的数据分析可以得出:随着满足系统备用需求的置信水平由 0.99 变化到 0.9,系统中最小发电成本由 563 394 USD 下降至 557 931 USD,节省了 5 463 USD,污染物排放量由 244.846 1 t 下降至 244.207 8 t,下降了 0.638 3 t;置信水平由 0.9 变化到 0.8,系统中最小发电成本由 557 931 USD 下降至 557 190 USD,节省了 741 USD,污染物排放量由 244.207 8 t 下降至 242.373 3 t,下降了 1.834 5 t。可见,系统发电总成本和污染物排放量都会随着满足系统正负旋转备

用需求的置信度水平的下降而减少,只是污染物排放量下降幅度相对于成本下降幅度较小。从而可以推出,经济效益和环境效益的提高可以通过置信度水平的降低来实现,但是这样势必也会使系统承担的运行风险相对升高。

4) 表 5 为在相同置信水平下,考虑机组启停前后的优化结果,可以看出考虑机组启停后,煤耗量成本降低了 15%,污染物排放量降低了 7%,提高了整个系统的能源环境效益。

表 5 考虑机组启停前后优化结果对比

Tab. 5 Comparison of optimal results considering unit start and stop

约束条件	煤耗量成本/USD	污染物排放量/t
考虑机组启停	563 394	244.846 1
不考虑机组启停	663 460	263.316 5

5 结 论

为兼顾环境效益和经济效益,本文建立了风火联合系统的双目标随机优化调度模型,该模型促进了现行电力系统调度方法的发展。在求解模型时,设计了一种分时段优化子问题的方法,针对每个子问题,采用优先顺序法和 MOPSO 算法相结合进行求解,提高了计算的精度和效率。最后,对含 10 台常规机组的风火联合系统进行发电优化调度,分析了考虑机组启停前后和不同置信度水平下问题的求解方案,仿真结果验证了所提调度方法的合理性和有效性,为电力系统调度运行人员在风火联合系统的调度过程中提供了一种新的思路。

参考文献:

- [1] 姜文,严正. 基于一种改进粒子群算法的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(21):173-178,183.
Jang Wen, Yan Zheng. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on IPSO [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 173-178, 183.
- [2] Chen C L. Optimal wind-thermal generating unit commitment[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(01): 273-280.
- [3] Lee T Y. Optimal spinning reserve for a wind-thermal power system using EIPSO[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(04): 1612-1621.
- [4] 孙元章,吴俊,李国杰. 基于风速预测和随机规划的含风

电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(04): 41-47.

- Sun Yuanzhang, Wu Jun, Li Guojie. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on wind speed forecasting and stochastic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(04): 41-47.
- [5] 江岳文,陈冲,温步瀛. 基于随机模拟粒子群算法的含风电场电力系统经济调度[J]. 电工电能新技术, 2007, 26(03): 37-41.
Jiang Yuewen, Chen Chong, Wen Buying. Economic dispatch based on particle swarm optimization of stochastic simulation in wind power integrated system [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2007, 26(03): 37-41.
 - [6] 周玮,孙慧,顾宏,等. 计及风险备用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, 2012, 32(01): 47-55, 19.
Zhou Wei, Sun Hui, Gu Hong, et al. Dynamic economic dispatch of wind integrated power systems based on risk reserve constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(01): 47-55, 19.
 - [7] 田廓,曾鸣,鄢帆,等. 考虑环保成本和风电接入影响的动态经济调度模型[J]. 电网技术, 2011, 35(06): 55-59.
Tian Kuo, Zeng Ming, Yan Fan, et al. A dynamic economic scheduling model considering environmental protection cost and impact of connecting wind power to power grid [J]. Power System Technology, 2011, 35(06): 55-59.
 - [8] 陈道君,龚庆武,张茂林,等. 考虑能源环境效益的含风电场多目标优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 10-17.
Chen Daojun, Gong Qingwu, Zhang Maolin, et al. Multi-objective optimal dispatch in wind power integrated system incorporating energy-environmental efficiency [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 10-17.
 - [9] 徐丽青,吴亚丽. 求解环境经济调度问题的多目标差分粒子群优化算法[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(01): 62-68.
Xu Liqing, Wu Yali. Model and multi-objective particle swarm optimization based on differential evolution for environmental/economic dispatch problem [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(01): 62-68.
 - [10] 沈州,杨伟,仲海波,等. 基于机会约束规划和随机模拟技术的含风电场电力系统多目标优化调度[J]. 电力学报, 2013, 28(01): 44-49, 53.
Shen Zhou, Yang Wei, Zhong Haibo, et al. Power system containing wind farm optimization scheduling with multi-objective based on chance-constrained and random simulation [J]. Journal of Electric Power, 2013, 28(01): 44-49, 53.

(责任编辑 周蓓)