

[电力系统]

考虑风电功率预测误差的电力系统经济优化调度

文/深圳市喜德科技有限公司 刘震
南方电网科学研究院有限责任公司 陈天明

为了提高电力系统优化调度的经济性，在考虑风电预测误差的基础上，提出了风电预期成本、高估成本及低估成本的计算方法，建立了考虑风电预测误差的电力系统经济优化调度模型，给出了模型的约束条件。采用狼群优化算法对模型进行求解，迭代次数更少，求解精度更高，验证了模型的实用性和求解方法的正确性。

随着“双碳”目标的提出，我国越来越重视节能减排。在未来能源结构中，清洁能源的比例将越来越大，风是一种储量丰富的清洁能源，风力发电不会产生任何碳排放，但风电具有较大的随机性和波动性，在并网过程中会对系统产生较大冲击。因此，对含风电场的电力系统经济优化调度模型进行研究，对于提高电力系统稳定性和风电利用率具有重要意义。

为了提高电力系统中风电接入的经济性，专家学者们开展了大量研究。邱革非等人对风力发电出力区间进行了优化，得到了保证系统稳定性的风电出力区间，建立了考虑风电接入的电力系统双层鲁棒区间的经济优化调度模型。刘起兴等人将风电和光伏发电预测误差计入电力系统经济调度优化模型的总成本，建立了包含风、光及火的多能源经济优化调度模型。叶泽等人对风光接入对火电机组调峰过程的影响，综合考虑电力系统优化调度的经济性，建立了以电网净负荷方差最小为上层优化目标、电网运行成本最小为下层优化目标的双层优化调度模型。上述学者虽然考虑了风电预测功率的影

响，提出了不同类型的电力系统优化调度模型，但对风电运行成本划分不够详细，导致模型的应用效果不够理想。

基于此，本文针对风电出力的不确定性，在考虑风电预测误差的基础上，提出了风电预期成本、高估成本及低估成本的计算方法，建立了考虑风电预测误差的电力系统经济优化调度模型，给出了模型的约束条件，并用狼群优化算法对模型进行求解，采用IEEE 30系统对模型的实用性和求解方法的正确性进行验证。

含风电场的电力系统经济优化调度模型

1. 目标函数

(1) 风力发电成本模型

风电功率具有较大的随机性和间歇性，准确预测风电功率较为困难，考虑到风电预测误差的影响，构建风力发电成本模型时引入风电预期成本、风电高估成本和风电低谷成本。

1) 风电预期成本。风电预期成本是由风力发电过程中产生的基本维护费用，其计算公式为

基金项目：中国南方电网有限责任公司科技项目（项目编号：ZBKJXM20170072）

$$F_{W\text{cost}} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_W} C_W P_{Wj,t} \quad (1)$$

式中, $F_{W\text{cost}}$ 为风电预期成本; $P_{Wj,t}$ 为第 j 台风电机组在 t 时刻的实际输出功率; N_W 为风电机组的数量; C_W 为风电预期成本系数。

2) 风电高估成本。当风电机组实际输出功率小于风电功率预测值时, 需要利用系统备用容量补充系统功率差额, 该过程产生的成本称为风电高估成本, 其计算公式为

$$F_{W+} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_W} C_{W+} (P_{Sj,t} - P_{Wj,t}) \quad (2)$$

式中, F_{W+} 为风电高估成本; $P_{Sj,t}$ 为第 j 台风电机组在 t 时刻的预测输出功率; C_{W+} 为风电高估成本系数。

3) 风电低估成本。当风电机组实际输出功率大于风电功率预测值时, 为了环保, 需要降低系统内火电机组的出力, 该过程产生的成本称为风电低估成本, 其计算公式为

$$F_{W-} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_W} C_{W-} (P_{Wj,t} - P_{Sj,t}) \quad (3)$$

式中, F_{W-} 为风电预期成本; C_{W-} 为风电低估成本系数。

因此, 考虑到风电功率预测误差产生的三类成本, 风力发电成本模型为

$$F_W = F_{W\text{cost}} + F_{W+} + F_{W-} \quad (4)$$

式中, F_W 为风力发电成本。

(2) 火力发电成本模型

火力发电的原料是燃煤, 因此燃煤成本是火力发电的主要成本。此外, 火电机组在工作过程中由于耗量特性会存在“阀点效应”, 该过程也会产生一部分成本, 故火力发电成本模型为

$$F_G = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) + \left| e_i \sin[f_i (P_{i,t}^{\min} - P_{i,t})] \right| \quad (5)$$

式中, F_G 为火力发电成本; $P_{i,t}^{\min}$ 为第 i 台火电机组在 t 时刻最小输出功率; N_G 火电机组的数量; f_i 为火电发电成本系数; a_i 、 b_i 、 c_i 为第 i 台火电机组耗量特性系数; $P_{i,t}$ 为第 i 台火电机组在 t 时刻的输出功率。

综上所述, 由风电和火电组成的电力系统经济优化调度模型为

$$\min F_{\text{total}} = F_W + F_G \quad (6)$$

2. 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{i,t} + \sum_{j=1}^{N_W} P_{Wj,t} = P_{\text{load}} \quad (7)$$

式中, P_{load} 为系统总负荷。

(2) 输出功率约束

火电机组功率约束为

$$P_{i,t}^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\max} \quad (8)$$

式中, $P_{i,t}^{\max}$ 为第 i 台火电机组在 t 时刻的最大输出功率; $P_{i,t}^{\min}$ 为第 i 台火电机组在 t 时刻的最小输出功率。

风电机组的功率约束为

$$0 \leq P_{Wj,t} \leq P_{Wj,t}^{\max} \quad (9)$$

式中, $P_{Wj,t}^{\max}$ 为第 j 台风电机组在 t 时刻输出功率最大值。

(3) 爬坡率约束

火电机组的投切需要在较短时间内完成, 因此每台机组运行过程中均对火电机组的爬坡率有要求, 即应在一定的时间内完成机组的起停, 约束条件为

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq r_{iu} T_{60} \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq r_{id} T_{60} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $P_{i,t-1}$ 为第 i 台火电机组在 $t-1$ 时刻的输出功率; r_{iu} 和 r_{id} 分别为第 i 台火电机组的最大爬坡率和最小爬坡率; T_{60} 为调度周期, 取60 min。

狼群优化算法

狼群优化算法 (Wolf Pack Algorithm, WPA)

是由吴虎胜等人于2013年提出的, 是一种求解精度更高的寻优算法。WPA的原理是模拟群狼捕食猎物获得最优解, 狼群算法把狼群分为三种, 分别是头狼、探狼和猛狼, 每种狼各司其职, 其中头狼只负责指挥, 探狼负责搜寻猎物, 猛狼负责攻击猎物。

狼群算法的定义:

设置狼群中人工狼容量为 N , 预寻优变量的数量为 D , 则人工狼的状态为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$,

1) 生成头狼。即寻找初始解中的最优解 Y_{lead} , 头狼并不是固定的, 在迭代计算的过程中, 所有狼的位置都会不断更新, 如果出现比头狼更好的解, 则取而代之。

2) 探狼游走。令 N 匹探狼中共有 M 匹探狼, M 的值由 $[N/(\alpha+1), N/\alpha]$ 决定, 其中 α 是指探狼占狼群

总量的比例因子, 探狼共向 h 个方向游走, 游走的步长为 step_a , 探狼的初始适应度为 Y_i , 探狼在当前位置基础上向 $p(p=1,2,\dots,h)$ 个方向每移动一步, 则 d 维中更新探狼的位置为

$$x_{id}^p = x_{id} + \sin(2\pi p/h) \times \text{step}_a^d \quad (11)$$

此时计算新的新适应度值 Y_{ip} , 如果比前适应度 Y_i 更好则替代, 并将探狼的位置设为 X_i , 然后比较探狼的新适应度与头狼适应度, 如果由于头狼适应度, 则用探狼代替头狼, 并召唤猛狼来当前位置, 否则继续寻优, 一直到最大迭代次数 $T_{\max}$ 。

3) 猛狼奔袭。猛狼是指除去另外两种狼的剩余部分, 它的个数为 $N-M$, 猛狼收到头狼的召唤后, 会立即奔向头狼, 猛狼奔袭的步长为 step_b , 猛狼在 d 维中的第 $k+1$ 次迭代时的位置为

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + \text{step}_b^d \times (g_d^k - x_{id}^k) / |g_d^k - x_{id}^k| \quad (12)$$

式中, g_d^k 为第 k 次迭代时头狼的位置。

猛狼奔袭后的适应度为 Y_i , 如果 Y_i 优于 Y_{lead} , 则这匹猛狼变为头狼, 并召唤其他猛狼过来, 否则猛狼继续向头狼奔袭, 直到距离头狼的位置小于 d_{near} 时, 开始攻击猎物, d_{near} 的计算为

$$d_{\text{near}} = \frac{1}{D\omega} \times \sum_{d=1}^D |\max_d - \min_d| \quad (13)$$

4) 围攻猎物。猛狼到位后, 将与探狼一起攻击猎物, 由于头狼距离猎物很近, 可以认为猎物的位置即为头狼的位置 G_d^k , 围攻猎物时的步长为 step_c , 狼群的位置更新为

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + \lambda \times \text{step}_c^d \times |G_d^k - x_{id}^k| \quad (14)$$

围攻猎物时狼群位置的适应度优于原来的适应度, 则替换更新, 否则不变。

三个步长 step_a 、 step_b 和 step_c 存在如下关系

$$\text{step}_a^d = \text{step}_b^d / 2 = \text{step}_c^d \times 2 = |\max_d - \min_d| / S \quad (15)$$

5) 更新狼群。在搜索猎物的过程中, 会淘汰掉适应度最差的 R 匹狼, 并随机产生 R 匹狼予以补充, R 由 $[N/2 \times \beta, N/\beta]$ 确定, 其中 β 为更新比例因子, S 为步长因子。

狼群优化算法原理简单、参数少, 且在寻优过程中不易陷入局部最优, 具有较高的求解精度, 目前得到了广泛应用。

本文采用狼群优化算法对电力系统优化调度进

行求解, 狼群优化算法的求解流程图如图1所示。

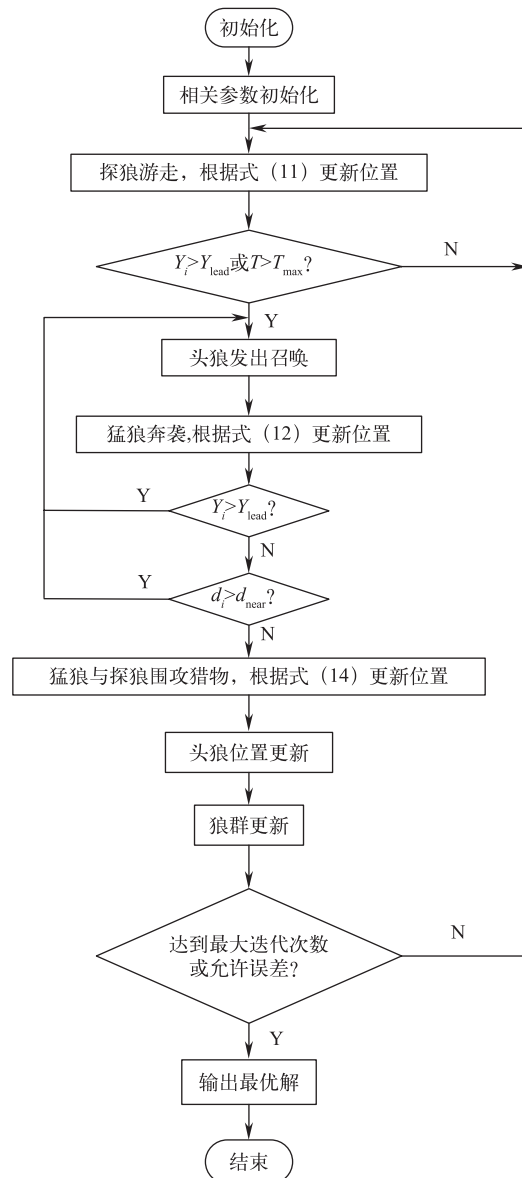


图1 改进WPA的流程图

具体步骤:

1) 首先对WPA的相关参数进行初始化设置, 设人工狼数量为 N , 初始位置为 X_i , 最大的游走次数 $T_{\max}$, 迭代次数为 $k_{\max}$, 步长因子为 S , 距离判定因子 ω , 探狼、更新比例因子为 α 和 β ;

2) 根据式(11)对探狼游走的位置进行更新, 直到探狼适应度 $Y_i > Y_{\text{lead}}$, 用该探狼替换头狼, 进行下一步, 否则, 继续游走直到达到最大次数 $T_{\max}$ 后进行下一步。

3) 根据式(12)对猛狼奔袭的位置进行更

新,直到探狼适应度 $Y_i > Y_{lead}$,用该猛狼替换头狼,否则继续奔袭直到与头狼距离小于 d_{near} 时进行下一步。

- 4) 根据式(14)对猎物进行围攻,并更新头狼。
- 5) 整个狼群进行更新。
- 6) 判断是否达到最大迭代次数或允许误差,若是则输出寻优结果,否则返回步骤2)。

算例分析

采用IEEE 30节点测试系统进行仿真分析,在测试系统中接入6台火电机组和1个风电场,6台火电机组接入位置分别为1、2、5、8、11、13节点,风电场接入位置为9节点,具体如图2所示。

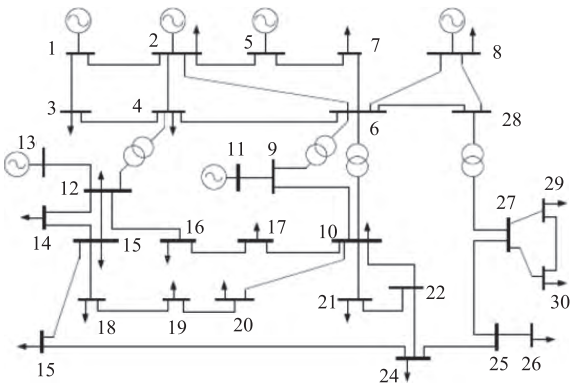


图2 6台火电机组接入节点系统的位置

采用上述系统对某地区2020年6月15日的用电情况进行经济优化调度,调度周期设为24 h,6台火电机组的耗量特性系数及各机组出力参数见表1。

表1 各机组耗量特性系数及出力参数

节点	P_{min}/MW	P_{max}/MW	耗量特性系数		
			a_i	b_i	c_i
G_1	50	250	0.003 5	2.45	0
G_2	25	150	0.013 5	1.95	0
G_5	15	100	0.055 5	1.30	0
G_8	15	120	0.007 5	3.55	0
G_{11}	10	80	0.22 1	3.15	0
G_{13}	10	90	0.021 4	3.50	0

调度日当天的负荷变化情况及风电场风电功率实际变化值和预测值分别如图3和图4所示。

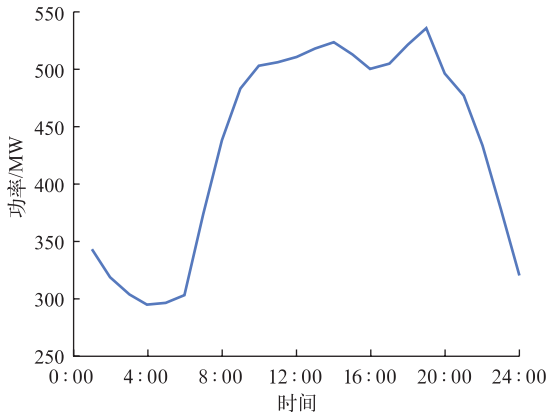


图3 调度日当天负荷变化情况

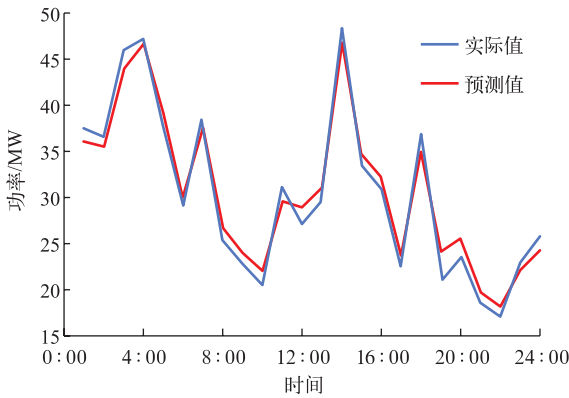


图4 调度日当天风电功率实际值与预测值

狼群算法的参数设置:人工狼数量 $N=100$,最大迭代次数 $k_{max}=300$,探狼比例因子 $\alpha=4$,步长因子 $S=800$,距离判定因子 $\omega=600$,探狼游走的最大次数 $T_{max}=20$,游走方向 $h=4$,更新比例因子 $\beta=5$ 。

C_w 、 C_{w+} 和 C_{w-} 分别取200元/MW、300元/MW和250元/MW。在MATLAB中建立仿真模型,利用狼群优化算法对电力系统经济优化调度模型进行求解,WPA算法的迭代寻优过程如图5所示,为了对比WPA的求解精度,利用粒子群优化算法(PSO)对本文模型进行求解,PSO算法的迭代寻优曲线也展示在图5中,对比图5中WPA和PSO算法的迭代曲线可知,WPA的迭代次数更少,求解精度更高。

两种优化算法的计算结果见表2。由表2可知,WPA在经过88次迭代后找到了最优解,即最小发电成本为302.3万元,而PSO算法需要123次迭代才能找到最优解,其最优解为304.9万元,WPA的求解结果比PSO算法低2.6万元,经济性更好。

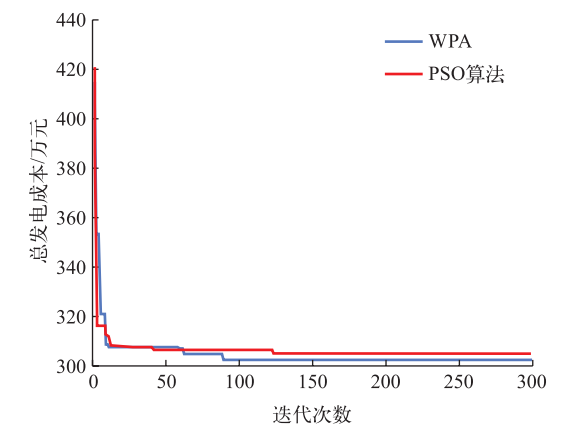


图5 WPA与PSO算法迭代曲线

表2 两种算法计算结果对比

优化算法	迭代次数	最优解/万元
WPA	88	302.3
PSO算法	123	304.9

当WPA取得最优解时，6台火电机组各时段输出功率见表3。

表3 6台火电机组各时段输出功率

时间	各火电机组输出功率/ MW					
	G_1	G_2	G_5	G_8	G_{11}	G_{13}
1:00	117.76	59.48	36.24	44.16	23.45	24.15
2:00	116.43	46.88	30.72	38.26	25.55	24.42
3:00	97.97	51.96	30.45	36.31	24.12	17.66
4:00	94.05	49.26	30.92	37.56	19.96	17.2
5:00	98.46	50.76	29.35	39.87	19.34	21.36
6:00	110.76	54.05	30.46	38.42	23.05	17.24
7:00	92.64	46.87	32.26	76.58	48.87	37.54
8:00	50	26.2	71.35	115.24	67.18	84.28
9:00	52.66	123.34	65.37	59.32	76.57	82.5
10:00	162.35	86.25	77.33	84.82	66.25	12.31
11:00	164.68	107.25	85.24	64.32	57.6	10.65
12:00	115.72	96.28	87.26	83.05	57.57	44.33
13:00	142.36	108.88	89.45	83.34	20.5	34.15
14:00	150.1	125.12	80.53	65.75	26.52	33.88
15:00	84.22	131.37	96.08	103.25	38.25	22.68
16:00	160.52	84.36	91.32	16.4	56.18	58.35
17:00	162.23	26.43	88.24	94.55	73.42	35.73
18:00	160.05	95.12	76.95	62.5	67.34	42.58
19:00	193.38	109.14	77.54	83.27	18.95	38.76
20:00	50.51	105.88	85.49	109.34	68.35	52.76
21:00	152.43	65.28	98.26	71.4	60.35	10.35
22:00	188.04	86.75	15.5	52.85	39.24	34.24
23:00	142.24	84.13	37.15	51.25	10	30.47
24:00	90.46	44.14	46.52	75.89	24.52	12.35

结束语

综合考虑风电功率预测误差对电力系统经济优化调度的影响，建立了考虑风电预测误差的电力系统经济优化调度模型，给出了模型的约束条件。采用狼群优化算法对模型进行求解，并与PSO算法的计算结果进行对比，结果表明，WPA的迭代次数更少，求解精度更高。验证了模型的实用性和求解方法的正确性。EA

(收稿日期：2021-12-22)

参考文献

[1] 周任军, 孙洪, 唐夏菲, 等. 双碳量约束下风电-碳捕集虚拟电厂低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1675-1683, 1904.

[2] 蔡绍宽. 双碳目标的挑战与电力结构调整趋势展望[J]. 南方能源建设, 2021, 8(3): 8-17.

[3] 马宁宁, 谢小荣, 亢朋朋, 等. 高比例风电并网系统次同步振荡的广域监测与分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 65-74, 398.

[4] 徐聪, 高强, 王羔则, 等. 平抑风电波动的混合储能系统控制方法[J]. 电源技术, 2020, 44(10): 1534-1537.

[5] 邱革非, 张鹏坤, 贺漂. 考虑风电接入的电力系统鲁棒经济优化调度[J]. 电力建设, 2021, 42(10): 101-109.

[6] 刘起兴, 王科, 聂涌泉, 等. 计及预测误差影响的电力系统异质多能源经济调度研究[J]. 计算机与数字工程, 2021, 49(6): 1068-1072, 1096.

[7] 叶泽, 李湘旗, 姜飞, 等. 考虑最优弃能率的风光火储联合系统分层优化经济调度[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2270-2280.

[8] 何廷一, 田鑫萃, 李胜男, 等. 基于蜂群算法改进的BP神经网络风电功率预测[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(4): 22-28.

[9] 乌巴特, 李帅奇. 风电场生产管理移动应用系统研究与开发[J]. 电气应用, 2020, 39(5): 61-66.

[10] 朱尤成, 王金荣, 徐坚. 基于ELSTM算法的区域风电发电量预测方法的研究[J]. 电气应用, 2020, 40(1): 55-59.