

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220305

# 混沌正余弦算法在含风能电力系统经济 排放调度中的应用

王庆, 李玉琛, 蒙飞, 袁和刚, 李涛, 孙阳

(国网宁夏电力有限公司调度控制中心, 宁夏 银川 750001)

**摘要:** 由于风能的随机性, 含风能的经济排放调度问题变得更加复杂。因此, 为了解决含风能的经济排放调度问题, 将该问题描述为一个机会约束问题来处理风力发电的随机特性。基于此, 提出了一种混沌正余弦算法来提供最优发电计划, 以同时最小化发电成本和碳排放量。该算法利用混沌序列替代正余弦算法的随机数, 避免了局部最优点的早熟收敛, 提高了了解的精度。然后, 对比实数编码化学反应优化算法和基于二次逼近的混合人工协同搜索算法, 通过2个10-unit案例仿真, 验证了所提方法的有效性和准确性。最后研究了约束条件阈值水平 $\sigma$ 对优化结果的影响, 当 $\sigma$ 增加时, 风电渗透率增加, 从而导致总生产成本和排放值的降低。

**关键词:** 风能; 混沌正余弦算法; 最优化; 经济排放

## Application of an improved chaotic sine cosine algorithm in the economic emission scheduling of a power system with wind energy

WANG Qing, LI Yuchen, MENG Fei, YUAN Hegang, LI Tao, SUN Yang

(Power Dispatch and Control Center, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China)

**Abstract:** Because of the random availability of wind energy, the economic emission scheduling (EED) problem with wind energy becomes more complex. Therefore, in order to solve this problem, this paper describes the problem as opportunity constrained to deal with the stochastic characteristics of wind power generation. A chaotic sine cosine algorithm (CSCA) is proposed to provide the optimal generation plan to minimize the generation cost and emission at the same time. The algorithm uses a chaotic sequence to replace the random number of an SCA, avoids premature convergence into a local optimum and improves the accuracy of solution. Finally, by comparing the real coded chemical reaction optimization algorithm with the hybrid artificial collaborative search algorithm based on quadratic approximation, the effectiveness and accuracy of the proposed method are demonstrated by two 10-unit case simulations. Finally, the impact of threshold level of constraints  $\sigma$  on optimization results is studied. When  $\sigma$  increases, the wind power permeability increases, resulting in the reduction of total production cost and emission value.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5108-202040024A-0-0-00).

**Key words:** wind energy; chaotic sine cosine algorithm; optimization; economic emission

## 0 引言

用化石燃料发电会向大气中释放硫氧化物(SO<sub>x</sub>)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和CO<sub>x</sub>, 大气污染会破坏

植被、导致全球变暖<sup>[1-2]</sup>。人们对环境保护的日益关注和1990年清洁空气法修正案的通过迫使电力公司减少碳排放, 因此不仅要以最优的价格产电, 而且要把污染降到最低<sup>[3]</sup>。

为了减少大气污染, 提出安装燃烧后清洁设备、改用低排放或零排放清洁能源等措施<sup>[4]</sup>, 因此计及新能源的调度研究成为研究热点<sup>[3,5-8]</sup>。文献[6]

**基金项目:** 国家电网公司科技项目资助(5108-202040024A-0-0-00)

提出考虑新能源出力随机特性的多目标电网深度调峰运行优化调度策略, 通过案例分析验证了其有效性。文献[7]构建了考虑新能源出力最差情况下的配电网双层鲁棒优化调度模型, 最终得到计及新能源波动的配电网最大供电能力调度方法。

此外, 考虑排放情况下进行调度也是一种减少污染与排放的调度方式<sup>[9-12]</sup>。文献[9]提出了一种同时兼顾电能生产经济性和系统排放低碳性的新型低碳经济调度模型, 并利用基于随机模拟的混合粒子群算法进行优化求解。文献[10]通过引入CO<sub>2</sub>过排放成本、风力发电的广义成本, 考虑碳排放配额及风电并网对系统发电成本的影响, 以系统综合发电费用最小为优化目标构建日前调度计划模型。文献[12]建立了以碳交易成本、火电机组发电成本和虚拟机组运行成本为目标的新型低碳经济调度模型, 采用细菌群体趋药性算法对模型进行求解。

从上述分析可以发现, 对于计及新能源与考虑排放调度问题, 已有一定的研究成果。近些年, 正余弦算法是一种新的基于种群的随机寻优方法, 利用正余弦函数使解震荡性的趋于全局最优解<sup>[13-15]</sup>。混沌<sup>[16-17]</sup>被认为是非线性系统的一种特征, 可以用数学方法表示为确定性系统产生的随机性, 由于混沌的不重复, 它可以以比依赖概率的随机搜索更快的速度进行整体搜索<sup>[18]</sup>。

基于此, 本文提出了一种混沌正余弦算法(chaotic sine cosine algorithm, CSCA)来提供最优发电计划, 以同时最小化发电成本和排放。该算法利用混沌序列替代正余弦算法(sine cosine algorithm, SCA)的随机数, 避免局部最优, 提高解的精度。

## 1 改进正余弦算法

### 1.1 基本正余弦算法

基于种群算法的主要优点是能够避免局部最优, 然而在基于群体的优化方法中, 寻找最优解的过程是随机执行的, 因此不能保证一次运行就能达到全局最优, 特别是对于非凸问题。但通过足够数量的候选解决方案和迭代, 可以增加获得期望解决方案的概率。在基本正余弦算法中, 正弦和余弦函数用于更新当前解的位置, 如式(1)所示。

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t + r_1 \times \sin(r_2) \times |r_3 \times P_j^t - X_{i,j}^t|, & r_4 < 0.5 \\ X_{i,j}^t + r_1 \times \sin(r_2) \times |r_3 \times P_j^t - X_{i,j}^t|, & r_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $t$  为当前迭代次数;  $X_{i,j}^t$  为第  $t$  次迭代中第  $i$  个个体在第  $j$  维空间中的位置;  $P_j^t$  为第  $t$  次迭代后算

法在第  $j$  维空间中的位置;  $r_1$  为正余弦振幅调节因子, 定义如式(2)所示。

$$r_1 = a \left( 1 - \frac{t}{T} \right) \quad (2)$$

式中:  $a$  为正常数;  $T$  为最大迭代次数。

### 1.2 改进混沌正余弦算法

在基于随机的优化算法中, 随机变量可以用混沌数代替, 得到的基于混沌算法的搜索行为不同于现有的优化技术。

近年来, 混沌图被广泛地整合到几种优化算法中, 混沌变量的遍历性和准随机特性使得优化算法能够增强种群多样性, 从而提高了混沌优化算法的探索能力。

本文中 SCA 所需的随机数是由混沌映射生成的。本文选用 Singer map, 如式(3)所示。

$$X_{i+1} = \mu \begin{pmatrix} 7.86X_i - 23.31X_i^2 + \\ 28.75X_i^3 - 13.302875X_i^4 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中,  $\mu$  的取值范围为 0.9~1.08, 此时 Singer map 混沌映射如图 1 所示。

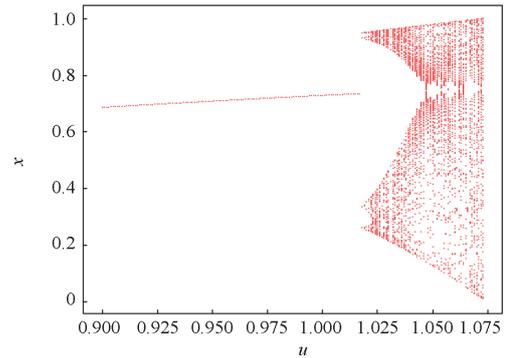


图 1 Singer map 混沌映射

Fig. 1 Chaotic Singer map

正余弦函数是基于两个相互排斥的方程, 在某些情况下, 这种搜索过程不能在开发和探索之间取得良好的平衡。为了缓解这一限制, 考虑了第 3 个方程, 本文所提算法的搜索行为基于以下 3 个突变方程。

若  $p_{roij} < a$ , 有

$$X_{ij}^{t+1} = X_{ij}^t + p_{roij} \times \sin(2\pi p_{roij}) \times |p_{roij} P_{ij}^t - X_{ij}^t| \quad (4)$$

若  $a \leq p_{roij} \leq \beta$ , 有

$$X_{ij}^{t+1} = X_{ij}^t + p_{roij} \times \cos(2\pi p_{roij}) \times |p_{roij} P_{ij}^t - X_{ij}^t| \quad (5)$$

若  $\beta < p_{roij}$ , 有

$$X_{ij}^{t+1} = p_{roij} X_{最优,j}^t + p_{roij} (X_{rand,j}^t - F_T X_{最优,j}^t) \quad (6)$$

式中： $p_{roj}$ 为混沌序列； $a, \beta$ 为随机数。从公式中可以看出，基本SCA的随机量被混沌映射生成的混沌变量所替代，形成改进的CSCA，其中搜索目标为发电机组和风电场功率， $F_T$ 将在下文中给出。

## 2 含风能的机会约束经济排放调度问题数学模型

### 2.1 机会约束规划问题

机会约束规划(chance-constraint problem, CCP)是继期望值模型之后，由A.Charnes和W.W.Cooper提出的第二类随机规划，CCP的原则是：允许所做决策在一定程度上不满足约束条件，但该决策使约束条件成立的概率不小于某一置信水平。一般形式的机会约束可表示为

$$\Pr\{f_i(x, \xi) \leq g_i\} \geq \beta_i \quad (7)$$

式中： $x$ 为决策变量； $\xi$ 为随机变量； $f_i(x, \xi) \leq g_i$ 是含随机变量的不等式约束； $\beta_i$ 为置信水平； $\Pr\{\cdot\}$ 为概率运算符。

### 2.2 考虑风电场机会约束经济调度问题

本文通过机会约束的经济排放调度(economic emission dispatch, EED)公式来处理不确定的风电输出，最小化的目标函数是总生产成本和有害气体的总排放量。实际应用中需要将阀点效应考虑到经济排放调度问题中，可将其表示为正弦函数形式。因此，总燃料成本 $C_T$ 和总排放函数 $E_T$ 见式(8)和式(9)。决策向量由火电机组功率输出 $P_i$ 组成。

$$C_T = \sum_{i=1}^{i=N} a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + \left| d_i \sin\{e_i (P_i^{\min} - P_i)\} \right| \quad (8)$$

$$E_T = \sum_{i=1}^{i=N} A_i + B_i P_i + C_i P_i^2 + D_i \exp(E_i P_i) \quad (9)$$

式中： $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i$ 为发电成本函数系数； $A_i, B_i, C_i, D_i, E_i$ 为污染排放函数系数。

在一些研究中，EED问题的双目标被转化为单目标优化问题，本研究采用基于价格惩罚因子的方法，因此需要最小化的经济/排放目标函数 $F_T$ 来描述，如式(10)所示。

$$F_T = \eta C_T + (1 - \eta) \lambda E_T \quad (10)$$

式中： $\eta$ 的取值范围为(0,1)，对于任意 $\eta$ 值，函数做最小化处理，以获得帕累托最优解； $\lambda$ 为所有机组价格惩罚因子的平均值， $\lambda$ 的计算方法如式(11)所示。

$$\lambda = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} \frac{C_{i\max}}{E_{i\max}} \quad (11)$$

### 2.3 约束条件

机会约束EED问题的确定性约束是所有热机组的发电极限，表示为

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

将风能纳入该问题可以通过在经典EED模型中添加一个新的随机约束并建模，如式(13)所示，该机会约束描述了负载 $P_D$ 、火电机组总发电量、风能输出功率 $W$ 和总系统损耗 $P_L$ 之间负荷平衡关系。

$$P_T \left\{ \sum_{i=1}^{i=N} P_i + W - P_D - P_L \geq 0 \right\} \geq 1 - \sigma \quad (13)$$

$$P_L = \sum_{i=1}^{i=N} \sum_{j=1}^{j=N} P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^{i=N} B_{oi} P_i + B_{oo} \quad (14)$$

同时，考虑到风速的随机性，可以用Weibull分布<sup>[19-20]</sup>来描述风速变化，式(15)所描述的双参数威布尔通常可以很好地逼近风速分布。相应的累积分布函数如式(16)所示。

$$f_v(v) = \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (15)$$

$$F_v(v) = \int_0^v f_v(\tau) d\tau = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right] \quad v \geq 0 \quad (16)$$

参数 $k$ 和 $c$ 取决于风源的位置，利用现有风速数据，可通过最小二乘拟合法、极大似然法、矩量法等来估计 $k$ 和 $c$ 。

## 3 案例分析与讨论

### 3.1 改进正余弦算法计算结果与精度

为了测试所提CSCA在求解包含风能的随机EED问题时的准确性，本节研究了两个不同复杂性的测试案例，Case1为不考虑风电的10-unit系统，Case2为考虑风电的10-unit系统，并且两个案例均考虑了传输损耗、阀点效应和发电容量的约束。

本系统单元数据来自文献[1]，如表1所示，总电力负荷为2000 MW，损失系数矩阵 $B$ 见式(17)。

在没有引入风电的前提下，根据所提的改进正余弦算法来计算，考虑经济排放调度的每个机组的优化结果如图2所示。从图2可以看出，本文所提算法比其他优化算法更可靠。

为了进一步对比不同算法的计算精度，每种算法的精度值都通过总需求与总负荷和功率损耗之和的差来计算，如式(18)所示。

$$R_e = \sum_{i=1}^{i=N} P_i - (P_D + P_L) \quad (18)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.000049 & 0.000014 & 0.000015 & 0.000015 & 0.000016 & 0.000017 & 0.000017 & 0.000018 & 0.000019 & 0.000020 \\ 0.000014 & 0.000045 & 0.000016 & 0.000016 & 0.000017 & 0.000015 & 0.000015 & 0.000016 & 0.000018 & 0.000018 \\ 0.000015 & 0.000016 & 0.000039 & 0.000010 & 0.000012 & 0.000012 & 0.000014 & 0.000014 & 0.000016 & 0.000016 \\ 0.000015 & 0.000016 & 0.000010 & 0.000040 & 0.000014 & 0.000010 & 0.000011 & 0.000012 & 0.000014 & 0.000015 \\ 0.000016 & 0.000017 & 0.000012 & 0.000014 & 0.000035 & 0.000011 & 0.000013 & 0.000013 & 0.000015 & 0.000016 \\ 0.000017 & 0.000015 & 0.000012 & 0.000010 & 0.000011 & 0.000036 & 0.000012 & 0.000012 & 0.000014 & 0.000015 \\ 0.000017 & 0.000015 & 0.000014 & 0.000011 & 0.000013 & 0.000012 & 0.000038 & 0.000016 & 0.000016 & 0.000018 \\ 0.000018 & 0.000016 & 0.000014 & 0.000012 & 0.000013 & 0.000012 & 0.000016 & 0.000040 & 0.000015 & 0.000016 \\ 0.000019 & 0.000018 & 0.000016 & 0.000014 & 0.000015 & 0.000014 & 0.000016 & 0.000015 & 0.000042 & 0.000019 \\ 0.000020 & 0.000018 & 0.000016 & 0.000015 & 0.000016 & 0.000015 & 0.000018 & 0.000016 & 0.000019 & 0.000044 \end{bmatrix} \quad (17)$$

表 1 10-unit 系统参数

Table 1 10-unit system parameters

Unit	$P_i^{\min}$	$P_i^{\max}$	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$d_i$	$e_i$	$A_i$	$B_i$	$C_i$	$D_i$	$E_i$
1	10	55	1000.403	40.5407	0.129 51	33	0.0174	360.0012	-3.9864	0.047 02	0.254 75	0.012 34
2	20	80	950.606	39.5804	0.109 08	25	0.0178	350.0056	-3.9524	0.046 52	0.254 75	0.012 34
3	47	120	900.705	36.5104	0.125 11	32	0.0162	330.0056	-3.9023	0.046 52	0.251 63	0.012 15
4	20	130	800.705	39.5104	0.121 11	30	0.0168	330.0056	-3.9023	0.046 52	0.251 63	0.012 15
5	50	160	756.799	38.5390	0.152 47	30	0.0148	13.8593	0.3277	0.004 20	0.249 70	0.012 00
6	70	240	451.325	46.1592	0.105 87	20	0.0163	13.8593	0.3277	0.004 20	0.249 70	0.012 00
7	60	300	1243.531	38.3055	0.035 46	20	0.0152	40.2669	-0.5455	0.006 80	0.248 00	0.012 90
8	70	340	1049.998	40.3965	0.028 03	30	0.0128	40.2669	-0.5455	0.006 80	0.249 90	0.012 03
9	135	470	1658.569	36.3278	0.021 11	60	0.0136	42.8955	-0.5112	0.004 60	0.254 70	0.012 34
10	150	470	1356.659	38.2704	0.017 99	40	0.0141	42.8955	-0.5112	0.004 60	0.254 70	0.012 34

通过计算可得到图 3 所示的精度对比图, 从计算精度看, 本文所使用的改进正余弦算法有着较高的计算精度。这是因为该算法利用混沌序列替代 SCA 的随机数, 避免了局部最优, 提高了解的精度。

### 3.2 考虑风电场的案例分析

根据 3.1 节的系统参数, 考虑由 50 个涡轮机组组成的风电场, 每个涡轮机的额定输出功率为 2 MW, 总需求功率同样为 2000 MW, 通过计算研究了包含

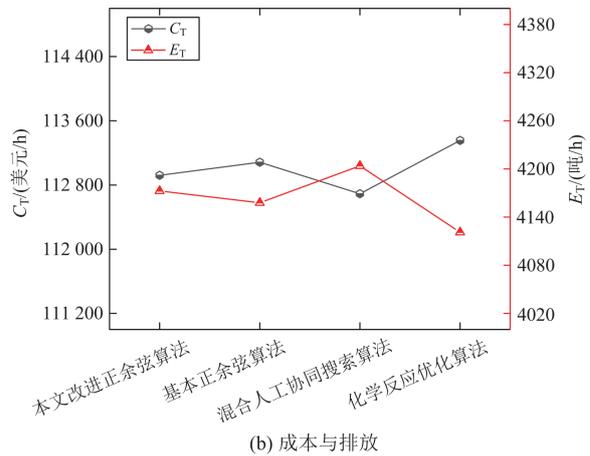
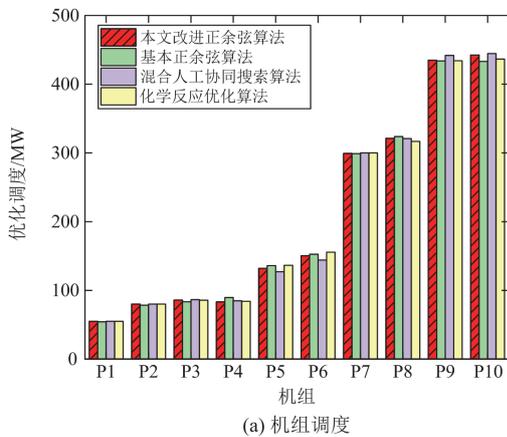


图 2 算例优化结果

Fig. 2 Example optimization results



(a) 机组调度

风电场的经济排放调度, 并求解了不同阈值  $\sigma$  对含风电场的 EED 问题的影响。以  $\sigma$  为 0.2、0.3 为例, 通过改进的正余弦算法计算可得不同机组及风电场的功率, 如图 4 所示, 阈值  $\sigma$  越大意味着使用的风电越多, 即阈值  $\sigma$  影响风电渗透率。进一步研究阈值

$\sigma$  对  $C_T$  和  $E_T$  的影响, 其计算结果如图 5 所示, 从图 5 中很明显地可以看出, 当  $\sigma$  增加时, 风电渗透率增加, 从而导致总生产成本和排放值的降低, 但是在实际问题中, 由于风能不足的风险,  $\sigma$  值偏小也是合理的。

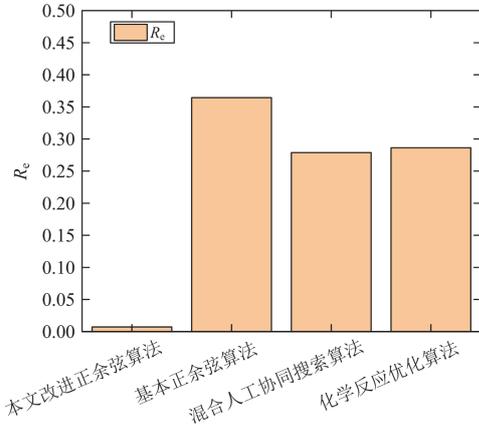


图 3 计算精度对比

Fig. 3 Comparison of calculation accuracy

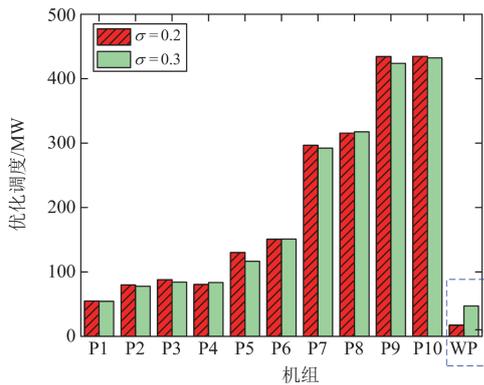


图 4 含风电场的求解结果

Fig.4 Solution results including wind farm

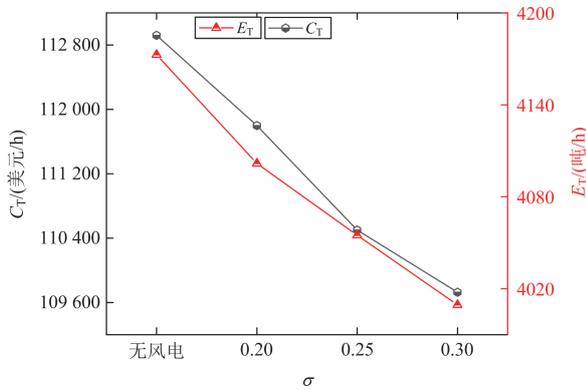


图 5  $\sigma$  对经济排放调度的影响

Fig. 5 Impact of  $\sigma$  on economic emission scheduling

## 4 结论

本文将含风能的经济排放调度描述为一个机会约束问题来处理风力发电的随机特性, 提出了一种混沌正余弦算法来提供最优发电计划, 以同时最小化发电成本和排放。

1) 改进的正余弦算法利用混沌序列替代 SCA 的随机数, 避免了局部最优, 提高了解的精度。

2) 通过案例分析发现, 对比实数编码化学反应优化算法和基于二次逼近的混合人工协同搜索算法, 所提方法更具准确性。

3) 研究了约束条件阈值  $\sigma$  对优化结果的影响发现, 当  $\sigma$  增加时, 风电渗透率增加, 从而导致总生产成本和排放值的降低。但是在实际问题中, 由于风能不足的风险,  $\sigma$  值偏小也合理的。

## 参考文献

- [1] BASU M. Economic environmental dispatch using multi-objective differential evolution[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(2): 2845-2853.
- [2] 沈晓倩. 我国电力行业碳排放达峰及减排潜力研究[J]. 应用能源技术, 2022(2): 24-26.  
SHEN Xiaoqian. Research on peak carbon emission and emission reduction potential of China's power industry[J]. Applied Energy Technology, 2022(2): 24-26.
- [3] MOHY-UD-DIN G, MUTTAQI K M, SUTANTO D. Adaptive and predictive energy management strategy for real-time optimal power dispatch from VPPs integrated with renewable energy and energy storage[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 1958-1972.
- [4] 赵东元, 胡楠, 傅靖, 等. 提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 1-8.  
ZHAO Dongyuan, HU Nan, FU Jing, et al. Research on China's practice and development path of improving the flexibility of new energy power system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 1-8.
- [5] LI Jinghua, WANG Sai, YE Liu, et al. A coordinated dispatch method with pumped-storage and battery-storage for compensating the variation of wind power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 21-34.
- [6] 应益强, 王正风, 吴旭, 等. 计及新能源随机特性的电网深度调峰多目标策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 34-42.  
YING Yiqiang, WANG Zhengfeng, WU Xu, et al. Multi objective strategy of power grid deep peak shaving considering the random characteristics of new energy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 34-42.

- [7] 白浩, 袁智勇, 周长城, 等. 计及新能源波动与相关性的配电网最大供电能力调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 66-73.  
BAI Hao, YUAN Zhiyong, ZHOU Changcheng, et al. Dispatching method of maximum power supply capacity of distribution network considering the fluctuation and correlation of new energy[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 66-73.
- [8] MOHANDS B, WAHBAH M, MOURSI M S E, et al. Renewable energy management system: optimum design and hourly dispatch[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(3): 1615-1628.
- [9] 皮霞, 赵宇洋, 吕金历, 等. 考虑高载能负荷消纳受阻风电收益的荷源协调优化方法[J]. 可再生能源, 2020, 38(8): 1079-1084.  
PI Xia, ZHAO Yuyang, LÜ Jinli, et al. A load-source coordinated optimization method considering the benefits of curtailed wind power consumption for energy-intensive loads[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(8): 1079-1084.
- [10] 张程飞, 袁越, 张新松, 等. 考虑碳排放配额影响的含风电系统日前调度计划模型[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2114-2120.  
ZHANG Chengfei, YUAN Yue, ZHANG Xinsong, et al. Daily scheduling plan model of wind power system considering the influence of carbon emission quota[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2114-2120.
- [11] 梁作放, 潘华, 何辉, 等. 考虑碳交易的区域综合能源系统经济调度研究[J]. 山东电力技术, 2020, 47(2): 20-26.  
LIANG Zuofang, PAN Hua, HE Hui, et al. Study on economic dispatch of regional integrated energy system considering carbon trading[J]. Shandong Electric Power Technology, 2020, 47(2): 20-26.
- [12] 卢志刚, 郭凯, 闫桂红, 等. 考虑需求响应虚拟机组和碳交易的含风电电力系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 58-65.  
LU Zhigang, GUO Kai, YAN Guihong, et al. Optimal dispatching of wind power system considering demand response virtual unit and carbon trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 58-65.
- [13] 李佳瑶, 刘伟娜. 考虑碳交易和风荷预测误差的电力系统低碳经济调度[J]. 浙江电力, 2021, 40(5): 1-6.  
LI Jiayao, LIU Weina. Low-carbon economic dispatch of power system considering carbon trading and wind power and load forecast errors[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(5): 1-6.
- [14] 张睿. 基于正余弦优化算法的改进及其应用[D]. 长春: 长春工业大学, 2021.  
ZHANG Rui. Improvement and application of sine cosine optimization algorithm[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2021.
- [15] 王远. 正余弦算法及其应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.  
WANG Yuan. Research on sine cosine algorithm and its application[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [16] 负保记, 白森珂, 张国. 基于混沌自适应粒子群算法的冷热电联供系统优化[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 123-130.  
YUN Baoji, BAI Senke, ZHANG Guo. Optimization of CCHP system based on chaotic adaptive particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 123-130.
- [17] 林敏洪, 侯祖锋, 王超, 等. 基于分布式内点法的输配协同优化调度[J]. 可再生能源, 2020, 38(9): 1226-1232.  
LIN Minhong, HOU Zufeng, WANG Chao, et al. Optimal dispatch for transmission distribution coordination system based on distributed interior point method[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(9): 1226-1232.
- [18] 陈东海, 蔡振华, 金力, 等. 多源融合下计及调频优化的经济调度研究[J]. 浙江电力, 2021, 40(4): 32-39.  
CHEN Donghai, CAI Zhenhua, JIN Li, et al. Research on economic dispatch considering frequency modulation optimization under multi-source integration[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(4): 32-39.
- [19] 温华洋, 朱华亮, 刘壮, 等. 基于三参数 Weibull 分布的安徽省年最大风速均一性检验[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(2): 77-83.  
WEN Huayang, ZHU Hualiang, LIU Zhuang, et al. Uniformity test of annual maximum wind speed in Anhui province based on three parameter Weibull distribution[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2021, 37(2): 77-83.
- [20] 丁明, 吴义纯, 张立军. 风电场风速概率分布参数计算方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 107-110.  
DING Ming, WU Yichun, ZHANG Lijun. Study on calculation method of wind speed probability distribution parameters of wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 107-110.

收稿日期: 2022-03-10; 修回日期: 2022-05-13

作者简介:

王庆(1986—), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为电网调度控制; E-mail:jsczxkp@126.com

李玉琛(1972—), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为电网建设;

蒙飞(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网调度控制。

(编辑 姜新丽)