

考虑条件风险价值的含多风电场电力系统经济调度^{*}

王云静¹, 王雅坤¹, 郑磊², 曲正伟¹

[1. 电力电子节能与传动控制河北省重点实验室(燕山大学), 河北 秦皇岛 066004;
2. 天津国电津能滨海热电有限公司, 天津 300459]

摘要: 针对单一 Copula 函数在描述风速相关性时的限制性, 通过引入 mix-Copula 函数获取具有相关性的多维风速样本。引入条件风险价值理论, 将风电功率的不确定性以经济性考量, 建立了一种含多风电场的电力系统经济调度模型, 协调经济性和安全性的问题。采用场景化理论对目标函数进行处理, 使得计算得以简化。以含 2 个风电场的 IEEE30 节点系统为算例, 分析风速相关性和置信水平对优化结果的影响, 验证模型的合理性及有效性。

关键词: 经济调度; 多风电场; Copula 函数; 条件风险价值; 场景化

中图分类号: TM 614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)08-0104-08

Economic Dispatch of Multiple Wind Farms Integrated Power System Considering Conditional Value-At-Risk^{*}

WANG Yunjing¹, WANG Yakun¹, ZHENG Lei², QU Zhengwei¹

[1. Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province (Yanshan University), Qinhuangdao 066004, China;
2. State Power Plant Tianjin Jinnengbinhai Thermal Power Corporation, Tianjin 300459, China]

Abstract: Considering the limitations of single Copula function, the mix-Copula was introduced to analysis the wind speed correlations. To harmonize the contradictory between economy and safety, an economic dispatch optimization model for power grid containing multi-wind farms was proposed. The model took the uncertainty in wind power under consideration based on conditional value-at-risk theory. In order to simplify the computation, the scene theory was allied to solve the model. Taking IEEE 30-bus system with two wind farms as an example, the influence of wind speed correlations and the credit level on the results of probabilistically optimal power flow were analyzed, indicating the feasibility and efficiency of the proposed model.

Key words: economic dispatch; multi-wind farms; Copula; conditional value-at-risk; scenario generation

0 引言

在能源消耗和环境污染日益严重的情况下, 风力发电具有无污染、无能耗的特点, 各个国家对风力发电都引起了重视。但是, 风电功率的不确

定性以及风电场之间风速的相关性给电力系统经济运行带来了新的问题和挑战^[1-2]。

文献[3]在经济调度模型中考虑按风电总量一定百分比作为增加的正、负旋转备用, 但该方法没有对风电不确定性进行准确的建模, 所

^{*} 基金项目: 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2016064)

作者简介: 王云静(1978—), 女, 博士研究生, 副教授, 研究方向为智能算法在电力系统中的应用。

王雅坤(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统经济运行。

增加的备用容量可能会过于保守或冒进。文献[4]将模糊理论运用到调度中,以总耗量成本作为隶属度函数,通过判断隶属度函数所对应的值是否最小作为满意度指标,但通过这种方式获得的调度结果受决策者主观意愿的影响。文献[5]基于机会约束规划原理,建立了含风电场电力系统经济调度模型,对于相关的约束条件,以概率约束的形式加以表示。文献[6]将条件风险理论引入到调度模型中,将安全约束转为风险约束进行处理,更好地考虑了各种不确定因素带来的风险。文献[7]针对风电出力及其电动车充放电的不确定性,以最大化的条件风险备用为目标,以购电成本为约束条件,建立了一种综合考虑各因素之间量化的关系调度方案。文献[8]通过 Nataf 逆变换建立了风速相关性模型,产生具有相关性的多维风速样本,但 Nataf 变换主要针对线性变换而言,具有一定的局限性。文献[9-10]针对风速分布呈现非线性和尾部相关性,引入 Copula 函数对风电场风速以及输出功率之间的结构进行建模,将风速与风机出力联合起来建立了概率模型分布函数。

本文针对 2 维风速分布模型,根据各风电场的风速边缘概率分布和相关关系,采用 mix-Copula 函数获取风速样本空间。在调度模型中,将风电场计划出力作为优化变量,结合条件风险价值理论,将因风电不确定性产生的成本引入到目标函数中,不仅从经济性的角度量化地表示了由风电不确定性产生的成本,还可以通过成本置信水平变化趋势来反映电力系统经济性与安全性的关系。

1 基于 Copula 函数的相关性分析

1.1 Copula 函数

Sklar 定理^[11]说明,如果随机变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的边缘分布为 $F_1, F_2, \dots, F_n$, 联合概率分布函数为 F , 则存在一个 Copula 函数 C , 使得:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C[F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)] \quad (1)$$

式中: $F(x_1, \dots, x_n)$ ——随机变量 $x_1, \dots, x_n$ 的多元联合分布函数;

$F_n(x_n)$ ——各分量的边缘分布函数。

1.2 Copula 函数的构建方法

(1) 确定风速的边缘概率分布。风速的边缘分布是指单个风电场的风速概率分布。本文采用 Weibull 分布来描述风速分布,边缘概率密度函数和边缘分布函数为

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (3)$$

式中: k ——形状参数(无量纲);

c ——尺度参数, m/s。

(2) Copula 函数的选择。以风电示范工程中相邻两个风电场的历史数据作为样本,所得风速边缘分布的频率直方图如图 1 所示。

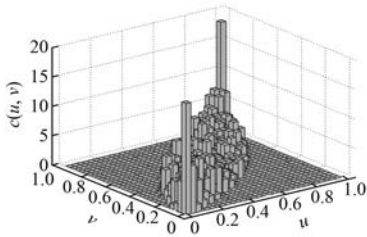


图 1 W_1 和 W_2 联合频率直方图

由图 1 可以看出,风速的相关结构具有尾部非对称,中部一定对称的特点。表 1 为常用单一 Copula 函数及其特点。由表 1 可知,单一 Copula 函数不能够对历史风速数据的相关结构的复杂性很好地分析。结合表 1 中各单一 Copula 的特点,为了更好地描述风速的相关结构,本文采用由 Gumbel-Copula、Clayton-Copula 和 Frank-Copula 函数组成的混合 Copula 函数(mix-Copula)来描述风速相关性。

表 1 Copula 函数及其特点

Copula	特点
Normal	对称相关性,无厚尾特性
t	对称相关性,具有一定厚尾特性
Gumbel	不对称相关性,具有较强上厚尾特性
Clayton	不对称相关性,具有较强下厚尾特性
Frank	对称相关性

mix-Copula 函数基本形式为

$$\begin{cases} C_m = w_g C_g + w_c C_c + w_f C_f \\ C_g = \exp(-[(-\ln(u))^\alpha + (-\ln(v))^\alpha]^{\frac{1}{\alpha}}) \\ C_c = (u^{-\beta} + v^{-\beta} - 1)^{-\frac{1}{\beta}} \\ C_f = -\gamma^{-1} \ln[1 - (1 - e^{-\gamma u})(1 - e^{-\gamma v}) / (1 - e^{-\gamma})] \end{cases} \quad (4)$$

式中: α, β, γ ——Archimedean Copula 的相关参数;
 w_g, w_c, w_f ——线性组合参数,反映了各单一 Copula 函数在 mix-Copula 中所占的重要程度,其中
 $w_g + w_c + w_f = 1, w_g \geq 0, w_c \geq 0, w_f \geq 0$ 。

(3) mix-Copula 函数的参数估计。mix-Copula 函数的参数估计分为两步:首先估计单一 Copula 函数的相关参数,然后以估计出的相关参数作为基准,估计 mix-Copula 函数的所有参数。

单一 Copula 函数的相关参数的估计,本文应用两阶段的极大似然法,即先对边缘分布函数的参数进行估计,然后将参数估计结果带入 Copula 函数,从而获得所需的单一 Copula 函数的参数。

边缘分布的估计值为

$$\hat{\theta}_i = \operatorname{argmax}_{\theta_i} \sum_{j=1}^N \ln f_i(x_{ij}; \theta_i) \quad (5)$$

Copula 函数的参数估计值为

$$\hat{\alpha} = \operatorname{argmax}_{\alpha} \sum_{j=1}^N \ln c[F_1(x_{1j}; \hat{\theta}_1), \dots, F_n(x_{nj}; \hat{\theta}_n)] \quad (6)$$

欧氏距离经常作为选择 Copula 函数的标准。欧式距离越短,表明所选用的 Copula 函数越恰当^[12]。鉴于此,本文对于 mix-Copula 函数的估计采用使得欧式距离最短的参数作为相关参数。

理论 Copula 函数(THC)和经验 Copula 函数(EMC)的欧式距离为^[11]

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n |C_n(u_i, v_i) - C(u_i, v_i)|^2} \quad (7)$$

式中: $C(u_i, v_i)$ ——THC 函数;

$C_n(u_i, v_i)$ ——EMC 函数。

mix-Copula 函数的估计过程为以权重参数 w_g, w_c, w_f 都为 1/3 和 Archimedean Copula 函数的相关参数 α, β, γ 估计值当作迭代初值,应用 MATLAB 工具箱中的 fmincon 函数求解 mix-Copula 函数的相关参数,程序采用二次规划方法,

并且在欧氏距离的变化值小于默认设置值时终止迭代,得到 mix-Copula 函数的各项参数。

以相邻两个风电场的历史数据作为样本,各 Copula 函数的相关参数结果如表 2 所示。

表 2 各 Copula 函数参数估计结果

Copula	α	β	γ	w_g	w_c	w_f	欧式距离
Gumbel	3.592 1						0.095 5
Clayton		3.445					1.171 8
Frank			13.17				0.131 1
mix	3.795 8	3.5	17.24	0.587	20.112 8	0.3	0.044 8

由表 2 可知, mix-Copula 函数的欧式距离最短,表明 mix-Copula 函数比单一 Copula 函数更适合描述该两个相邻风电场的风速相关性。

2 条件风险价值理论

2.1 风险价值和条件风险价值

风险价值(VaR)作为金融领域广泛应用的一种风险度量工具,为许多复杂的投资组合提供了一个综合性比较强的风险度量框架^[13]。但由于 VaR 存在缺乏次可加性、尾部损失测量存在非充分性等缺点,使得它的应用受到一定程度的限制。条件风险价值(CVaR)能够反映损失超过 VaR 临界值时可能承受的平均潜在损失,与 VaR 相比更能反映潜在的风险价值。VaR 与 CVaR 的关系如图 2 所示。

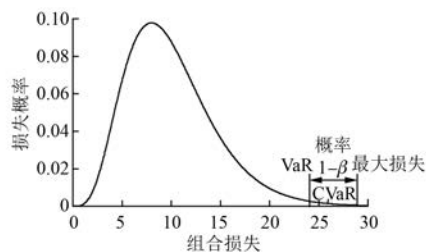


图 2 VaR 与 CVaR 的关系

2.2 条件风险价值的基本原理

设 $X \subset R^n, x \in X$ 为 n 维决策变量; $y \in R^m$ 为 m 维随机变量,表示和 X 有关的不确定性因素; $f(x, y)$ 是和 x, y 有关的损失函数; y 的概率密度函数为 $\varphi(y)$ 。由 y 引起的损失 $f(x, y)$ 不超过临界值 α 的概率为

$$\psi(x, \alpha) = \int_{f(x, y) \leq \alpha} \rho(y) dy \quad (8)$$

对于给定的置信水平 β , α 存在一个相应的集合, 则最小值为风险价值:

$$f_{\text{VaR}_\beta}(x) = \min\{\alpha \in R: \psi(x, \alpha) \geq \beta\} \quad (9)$$

置信水平 β 表示了决策者对风险的态度。 β 越大, 表明决策人员对安全水平的要求越高, 对风险越排斥。

条件风险值 f_{CVaR_β} 的表达式为

$$f_{\text{CVaR}_\beta}(x) = E[f(x, y) | f(x, y) \geq f_{\text{VaR}_\beta}(x)] = \frac{1}{1 - \beta} \int_{f(x, y) \geq f_{\text{VaR}_\beta}(x)} f(x, y) \rho(y) dy \quad (10)$$

$f_{\text{CVaR}_\beta}(x)$ 难以解析求出, 可引入一个辅助函数 $F_\beta(x, \alpha)$ 来计算 $f_{\text{CVaR}_\beta}(x)$ 的值^[14]:

$$F_\beta(x, \alpha) = \alpha + \frac{1}{1 - \beta} \int_{y \in R^m} [f(x, y) - \alpha]^+ \rho(y) dy \quad (11)$$

$$f_{\text{CVaR}_\beta}(x) = \min F_\beta(x, \alpha) \quad (12)$$

其中: $[t]^+ = \max\{t, 0\}$ 。

3 基于场景化处理方法

为简化计算, 将基于条件风险价值的风电成本作场景化处理。场景化处理方法是指用一组离散的概率分布序列 $[x_i, p_r(i)]$, $i = 1, 2, \dots, M$, 近似描述连续分布函数的过程^[15]。其中, x_i 为场景 i 的分位点, $p_r(i)$ 为该场景对应的概率, S 为场景总数。基于 Copula 函数的风电出力的场景化处理步骤如下:

(1) 根据风速的边缘分布函数构建风速的二维 mix-Copula 函数, 并产生满足该 Copula 分布的二维风速样本。

(2) 将所产生的二维风速样本均匀地分为 s 类(场景数目), 并将每类中心(该类中所有样本的均值) $u^s = [u_1^s, u_2^s, \dots, u_n^s]$ 作为每个场景的场景分位点; 为保证对于整个样本空间而言各类中心点的估计是无偏的, 统计每类样本的数量, 计算其占样本总数的比例, 并将该比例作为每个场景的概率 $p(i)$, $i = 1, \dots, s$ 。

(3) 采用边缘分布函数的逆运算 $x_i^s = F_i^{-1}(u_i^s)$, 将各场景的场景分位点 $u^s = [u_1^s, u_2^s, \dots, u_n^s]$ 转换为原联合分布函数的场景。

(4) 根据式(13)计算出风电出力的场景分位点, 各场景分位点所对应的概率为 $p(i)$, $i = 1, \dots, s$ 。

$$P_j^{\text{wa}}(v) = \begin{cases} 0 & (0 \leq v < v_{\text{in}}, v > v_{\text{out}}) \\ av^k + b & (v_{\text{in}} \leq v < v_{\text{rate}}) \\ P_j^{\text{wR}} & (v_{\text{rate}} \leq v \leq v_{\text{out}}) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} a = \frac{P_j^{\text{wR}}}{v_{\text{rate}}^k - v_{\text{in}}^k} \\ b = \frac{v_{\text{in}}^k P_j^{\text{wR}}}{v_{\text{in}}^k - v_{\text{rate}}^k} \end{cases} \quad (14)$$

式中: v_{in} ——风机切入风速;

v_{out} ——风机切出风速;

a, b ——风机功率特性参数;

P_j^{wR} ——风电场 j 额定装机容量;

v_{rate} ——风机额定风速。

4 考虑风电成本的电力系统经济调度模型

4.1 计及阀点效应的火电成本

在电力系统中火电机组单台单时段的成本函数通常用机组有功出力的二次函数表示:

$$f_h(P_{i,t}^g) = a_i (P_{i,t}^g)^2 + b_i P_{i,t}^g + c_i \quad (15)$$

式中: $f_h(P_{i,t}^g)$ ——火电机组 i 在 t 时刻的煤耗成本;

a_i, b_i, c_i ——相应机组煤耗成本函数的系数;

$P_{i,t}^g$ ——火电机组 i 在 t 时刻的有功出力。

此外, 在发电成本中应该考虑阀点效应产生的成本, 否则会使发电成本误差较大, 其能耗成本为

$$f_v(P_{i,t}^g) = |d_i \sin\{e_i [P_i^{\text{g}, \min} - P_{i,t}^g]\}| \quad (16)$$

式中: d_i, e_i ——阀点特性参数;

$P_i^{\text{g}, \min}$ ——机组 i 的有功出力下限值。

4.2 风电成本

由于风力发电具有不确定性, 在含风电场的电力系统经济调度中, 过高及过低估计风电出力都会增加系统的运行成本。每个时段风电不确定性引起的风电成本定义为

$$f_w(P_{j,t}^{\text{ws}}, P_{j,t}^{\text{wa}}) = f_{w+}(P_{j,t}^{\text{ws}}, P_{j,t}^{\text{wa}}) + f_{w-}(P_{j,t}^{\text{ws}}, P_{j,t}^{\text{wa}}) \quad (17)$$

$$f_{w+}(P_{j,t}^{ws}, P_{j,t}^{wa}) = \begin{cases} k_r(P_{j,t}^{ws} - P_{j,t}^{wa}) & 0 \leq P_{j,t}^{wa} < P_{j,t}^{ws} \\ 0 & P_{j,t}^{ws} < P_{j,t}^{wa} \leq P_j^{wr} \end{cases} \quad (18)$$

$$f_{w-}(P_{j,t}^{ws}, P_{j,t}^{wa}) = \begin{cases} k_p(P_{j,t}^{wa} - P_{j,t}^{ws}) & P_{j,t}^{ws} < P_{j,t}^{wa} \leq P_j^{wr} \\ 0 & 0 \leq P_{j,t}^{wa} < P_{j,t}^{ws} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_{j,t}^{ws}$ ——第 j 个风电场 t 时段的计划出力;
 $P_{j,t}^{wa}$ ——第 j 个风电场 t 时段的实际可利用出力;

$f_{w+}(P_{j,t}^{ws}, P_{j,t}^{wa})$ $f_{w-}(P_{j,t}^{ws}, P_{j,t}^{wa})$ ——第 j 个风电场 t 时段高估风电成本和低估风电成本;

k_r, k_p ——高估成本系数和低估成本系数。

由于风电出力具有不确定性,那么风电成本的确定就是一个有风险的优化问题,因此本文对风电成本用条件风险价值加以表示。这样,不仅可以计算风电成本,而且还可以通过置信水平反映系统对安全水平的要求程度。

基于条件风险价值理论,结合式(8)~式(12),可得高估和低估风电成本的条件风险价值形式的表达式分别为^[16]

$$\begin{cases} \min \left\{ F_{\beta_1}(P_{j,t}^{ws}, \alpha_{1j,t}) = \alpha_{1j,t} + \frac{1}{1 - \beta_1} \int_0^{P_j^{wr}} \right. \\ \left. \max [f_{w+}(P_{j,t}^{ws}, P_{j,t}^{wa}) - \alpha_{1j,t}, 0] \varphi(P_{j,t}^{wa}) dP_{j,t}^{wa} \right\} \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \min \left\{ F_{\beta_1}(P_{j,t}^{ws}, \alpha_{1j,t}) = \alpha_{1j,t} + \frac{1}{1 - \beta_1} \int_0^{P_j^{wr}} \right. \\ \left. \max [f_{w+}(P_{j,t}^{ws}, P_{j,t}^{wa}) - \alpha_{1j,t}, 0] \varphi(P_{j,t}^{wa}) dP_{j,t}^{wa} \right\} \end{cases} \quad (21)$$

风电成本条件风险价值形式的表达式:

$$\min [F_{\beta}(P_{j,t}^{ws}, \alpha_{1j,t}, \alpha_{2j,t}) = F_{\beta_1}(P_{j,t}^{ws}, \alpha_{1j,t}) + F_{\beta_2}(P_{j,t}^{ws}, \alpha_{2j,t})] \quad (22)$$

对式(20)、式(21)进行场景化分析得

$$\begin{aligned} F_{\beta_1}(P_{j,t}^{ws}, \alpha_{1j,t}) &= \alpha_{1j,t} + \frac{1}{(1 - \beta_1)} \sum_{i=1}^s \\ \max [f_{w+}(P_{j,t}^{ws}, P_{j,t}^{wai}) - \alpha_{1j,t}, 0] p_{r,t}(i) & \quad (23) \\ F_{\beta_2}(P_{j,t}^{ws}, \alpha_{2j,t}) &= \alpha_{2j,t} + \frac{1}{(1 - \beta_2)} \sum_{i=1}^s \end{aligned}$$

$$\max [f_{w-}(P_{j,t}^{ws}, P_{j,t}^{wai}) - \alpha_{2j,t}, 0] p_{r,t}(i) \quad (24)$$

式中: $P_{j,t}^{wai}, p_{r,t}(i)$ —— $P_{j,t}^{wai}$ 通过场景化的方法产生的场景序列 $[P_{j,t}^{wai}, p_{r,t}(i)]$ ($i = 1, 2, \dots, s$)。

4.3 目标函数

含风电场电力系统经济调度的目标函数为

$$\min \sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in N_g} [f_h(P_{i,t}^g) + f_v(P_{i,t}^g)] + \sum_{j \in N_w} F_{\beta}(P_{j,t}^{ws}, \alpha_{1j,t}, \alpha_{2j,t}) \right) \quad (25)$$

4.4 约束条件

(1) 功率平衡约束:

$$\sum_{i \in N_g} P_{i,t}^g + \sum_{j \in N_w} P_{j,t}^{ws} = P_{d,t} \quad t \in T \quad (26)$$

式中: $P_{d,t}$ ——在 t 时段的负荷。

(2) 风电场出力计划约束:

$$0 \leq P_{j,t}^{ws} \leq P_j^{wr} \quad t \in T \quad (27)$$

(3) 火电机组出力约束:

$$P_i^{g, \min} \leq P_{i,t}^g \leq P_i^{g, \max} \quad t \in T \quad (28)$$

式中: $P_i^{g, \max}, P_i^{g, \min}$ ——火电机组 i 的最大和最小出力。

(4) 火电机组爬坡约束:

$$-R_{dg} T_{60} \leq P_{i,t}^g - P_{i,t-1}^g \leq R_{ug} T_{60} \quad t \in T \quad (29)$$

式中: R_{dg}, R_{ug} ——各火电机组的向下和向上爬坡速率;

T_{60} ——机组单位运行时间,在本文中取 1 h。

(5) 临界值 α 约束:

$$\begin{cases} 0 \leq \alpha_{1j,t} \leq k_r P_j^{wr} \\ 0 \leq \alpha_{2j,t} \leq k_p P_j^{wr} \end{cases} \quad t \in T \quad (30)$$

5 调度模型的求解

粒子群算法(PSO)以其操作简单、收敛速度快等优点,在求解含风电场的电力系统的经济调度问题中得到了很好的应用。

基本粒子群算法的表达式为

$$\begin{cases} v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 \cdot r_1 [p_i(t) - x_i(t)] + \\ c_2 \cdot r_2 [p_g(t) - x_i(t)] \\ x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \end{cases} \quad (31)$$

式中: c_1, c_2 ——学习因子;

r_1, r_2 ——相互独立且在 $(0, 1)$ 之间服从均匀分布的随机数;

ω ——惯性权重。

由于粒子群算法存在“早熟”收敛的问题,为得到更好的最优解,本文对其加以改进。

5.1 惯性权重的改进

惯性权重 ω 对粒子群算法的收敛能力有着极其重要的影响。本文通过引入反正切惯性权重,使惯性权重随着迭代次数的增加而减少,达到在开始全局寻优能力强、在后期局部寻优能力强的作用。

改进的惯性权重表达式为^[17]

$$\omega = (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \arctan\left[\left(\frac{\pi}{2}\right) \left[1 - \left(\frac{t}{t_{\max}}\right)^k\right]\right] + \omega_{\min} \quad (32)$$

式中: $t_{\max}$ ——最大迭代次数;

$\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ ——预设惯性权重的最大值和最小值;

k ——控制因子,控制着 ω 随 t 变化的平滑度。

5.2 学习因子的改进

学习因子 c_1 和 c_2 分别影响着粒子向自身经验及群体中的最优个体学习的程度,进而对粒子的寻优轨迹造成影响。为了能使学习因子更好地发挥作用,本文采用异步时变的方法对其加以改进。

$$c_1 = c_{1s} + (c_{1e} - c_{1s}) \left[\arccos\left(\frac{-2t}{t_{\max}} + 1\right) / \pi \right] \quad (33)$$

$$c_2 = c_{2s} + (c_{2e} - c_{2s}) \left[\arccos\left(\frac{-2t}{t_{\max}} + 1\right) / \pi \right] \quad (34)$$

式中: c_{1s} 、 c_{1e} —— c_1 的初始值和终值;

c_{2s} 、 c_{2e} —— c_2 的初始值和终值,均为常数。

5.3 粒子可行化调整

在运用粒子群算法求解优化问题时,由于不等式和等式约束的可行域通常比较窄小,在优化过程中要快速地满足约束要求,尤其是等式约束的要求具有一定的难度。为此,本文采用可行化调整方案,每次迭代过程中对不满足等式约束要求的粒子进行调整,具体的调整方案^[18]:

(1) 当 $\sum_{i \in N_g} P_{i,t}^g + \sum_{i \in N_w} P_{j,t}^{ws} > P_{d,t}$ 时,按照每台火电机组在准许的范围内减少出力的原则,对火电机组的出力进行调整,调整后其出力为:

$$P_{i,t}^{g*} = P_{i,t}^g -$$

$$\frac{(P_{i,t}^g - P_{i,t}^{g,\min}) \cdot \left(\sum_{i \in N_g} P_{i,t}^g + \sum_{i \in N_w} P_{j,t}^{ws} - P_{d,t} \right)}{\sum_{i \in N_g} P_{i,t}^g - \sum_{i \in N_g} P_{i,t}^{g,\min}} \quad (35)$$

其中:

$$P_{i,t}^{g,\min} = \begin{cases} P_i^{g,\min} & t = 1 \\ \max(P_i^{g,\min}, P_{i,t-1}^g - R_{dg} T_{60}) & 2 \leq t \leq T \end{cases}$$

式中: $P_{i,t}^{g,\min}$ ——火电机组 i 在 t 时段的出力下限。

(2) 当 $\sum_{i \in N_g} P_{i,t}^g + \sum_{i \in N_w} P_{j,t}^{ws} < P_{d,t}$ 时,同理,按式

(36) 对火电机组调整后的出力为:

$$P_{i,t}^{g*} = P_{i,t}^g - \frac{(P_{i,t}^{g,\max} - P_{i,t}^g) \left(\sum_{i \in N_g} P_{i,t}^g + \sum_{i \in N_w} P_{j,t}^{ws} - P_{d,t} \right)}{\sum_{i \in N_g} P_{i,t}^{g,\max} - \sum_{i \in N_g} P_{i,t}^g} \quad (36)$$

其中:

$$P_{i,t}^{g,\max} = \begin{cases} P_i^{g,\max} & t = 1 \\ \min(P_i^{g,\max}, P_{i,t-1}^g + R_{ug} T_{60}) & 2 \leq t \leq T \end{cases}$$

式中: $P_{i,t}^{g,\max}$ ——火电机组 i 在 t 时段的出力上限。

6 算例分析

本文以含 2 个风电场的 IEEE-30 节点系统进行仿真计算。假设两个风电场的装机容量均为 60 MW,每台风机的切入风速、额定风速和切出风速分别为 3.5 m/s、13 m/s 和 30 m/s。为便于对调度的结果进行分析,本文的研究周期设为 3 个时段,每个时段的时间为 1 h,假设各个时段的负荷为一定值。高估风电成本系数 $k_r = 30$ \$/MWh,低估风电成本系数 $k_p = 20$ \$/MWh,置信水平取为 0.95。粒子群算法的参数设置如下:种群规模为 100,最大迭代次数的取值为 100, $\omega_{\max} = 0.9$, $\omega_{\min} = 0.4$, $k = 5$, $c_{1s} = 2.5$, $c_{1e} = 0.5$, $c_{2s} = 0.5$, $c_{2e} = 2.5$ 。火电机组参数如表 3 所示,各时段风速及负荷预测值如表 4 所示。

在电力系统经济调度中,可借助已有的风速预测理论和对历史数据进行估计获得各个时段的风速均值和其概率分布中参数的预测值,负荷预

表 3 火电机组参数

机组所在节点	出力下限/MW	出力上限/MW	上调爬坡率/(MW·min ⁻¹)	下调爬坡率/(MW·min ⁻¹)
1	50	200	2.00	-2.00
2	20	80	0.80	-0.80
5	15	50	0.50	-0.50
8	10	35	0.35	-0.35
11	10	30	0.30	-0.30
13	12	40	0.40	-0.40

表 4 风速和负荷预测结果

时段	W ₁		W ₂		系统负荷/MW	风电预测功率/MW	
	c	k	c	k		W ₁	W ₂
1	10.2	2.47	10.1	2.31	268.8	19.10	18.20
2	10.9	2.53	10.6	2.48	274.5	28.30	26.60
3	11.4	2.65	11.2	2.42	283.4	34.70	31.50

测与风速预测类似。由于本文研究的主要内容并非风速预测,本文算例中的预测数据均来自历史统计数据。

为对比分析风电场的接入以及风速相关性对系统经济调度的影响,设计了 4 种运行方式,系统成本如表 5 所示。

表 5 不同运行方式下的系统成本对比

运行方式	火电成本/ \$	风电成本 CVaR 值/ \$	总成本/ \$
方式 1	31 363	0	31 363
方式 2	24 612	1 946	26 558
方式 3	25 617	1 391	27 008
方式 4	24 813	2 013	26 826

方式 1:系统中不含风电场,所有负荷均由火电机组承担;

方式 2:风电计划出力参与优化,但不考虑风速的相关性;

方式 3:考虑风速相关性,以风电功率预测值作为计划出力;

方式 4:考虑风速相关性且风电计划出力参与优化。

由表 5 可知:

(1) 与方式 1 相比,方式 2~4 的火电成本均有不同程度的下降,系统的总成本分别下降了 4 805 \$、4 355 \$ 和 4 537 \$。这说明风电场接入后起到了替代部分火电机组的作用,减弱了火

电机组在整个电力系统所占的比重,节约了整个系统的发电成本。以上只是从可计算的经济成本而言,此外由于风电接入系统,一定程度缓解了日益加重的能源危机和环境污染,带来良好的“环境效益”。

(2) 对比方式 2 与方式 4 可以看出,方式 2 比方式 4 系统总成本减少了 268 \$。这是由于当相邻两风电场间的风速相关性较强时,风速同增同减的概率比较大,从而引起风电场出力的波动比较大,而随着风速相关性的降低,当风速相互独立时,风电场间的风速表现出具有互补的趋势,风电场出力的波动减小,火电成本和系统总的运行成本减少。因此,在考虑相邻风电场系统运行成本时,应当充分考虑风速的相关性对调度的影响,否则会导致调度决策失误,增加系统的运行成本。

(3) 对比方式 3 与方式 4 可以看出,将风电计划出力作为优化变量参与优化后,方式 4 虽风电成本 CVaR 值有所上升,但总成本下降了 182 \$,说明风电计划出力作为决策变量参与优化后,提高了系统的经济性。

表 6 给出了风速相关性为 mix-Copula 分布时,每个时段的火电机组和风电场的计划出力值。

表 6 方式 4 下的经济调度方案

时段	火电机组出力/MW						风电计划出力/MW	
	G1	G2	G5	G8	G11	G13	W ₁	W ₂
1	129.71	23.38	24.69	20.23	13.54	13.37	23.25	20.63
2	114.23	30.62	21.91	17.35	14.96	15.82	34.24	25.37
3	105.30	35.43	19.56	14.69	14.32	16.45	42.31	35.34

图 3 为不同置信水平下总成本的变化曲线。由图 3 可知,随着置信水平由 0.90 增大到 0.99,系统的总运行成本也相应增加。置信水平为系统运行的安全指标,置信水平越大,对系统安全性的

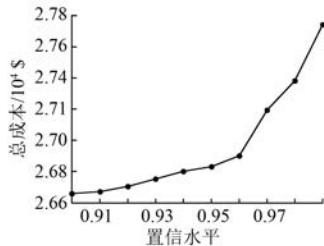


图 3 成本随置信水平的关系曲线

要求越高,此时系统总的运行成本增大,系统的经济性变差。因此,规划调度人员可根据具体的实际情况,综合考虑系统运行对安全性和经济性的要求程度来确定系统的调度方案。

为了验证所提出的改进粒子群算法在避免算法早熟和寻优方面更有优势,本文将基本粒子群算法和改进粒子群算法加以比较。图4为不同粒子群算法的进化曲线。从图4可以看出,改进粒子群算法虽迭代次数比基本粒子群算法多,但改进粒子群算法更加节约运行成本。这说明改进粒子群算法在避免算法早熟方面更有优势。

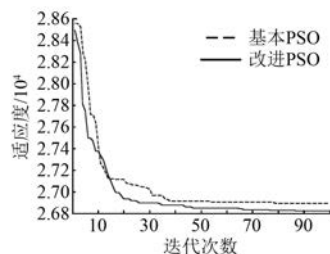


图4 适应度随迭代次数的关系曲线

7 结 语

本文基于条件风险价值理论构建了含多风电场的电力系统经济调度模型。在该模型中,采用mix-Copula函数描述多风电场间的风速相关性,结果表明,mix-Copula函数能很好地刻画风速的相关性;在目标函数中加入因风电不确定性而产生的风电成本,并且采用条件风险价值理论对其加以表示,很好地协调了安全性与经济性之间的关系;考虑风电场间风速相关性后运行成本增加,在制定调度方案时对其应引起足够的重视,否则会产生一定的误差,造成额外的经济损失。

【参考文献】

- [1] 从晶,宋坤,鲁海威,等.新能源电力系统中的储能技术研究综述[J].电工电能新技术,2014,33(3): 53-59.
- [2] 邓威,李欣然,徐振华,等.考虑风速相关性的概率潮流计算及影响分析[J].电网技术,2012,36(4): 45-50.
- [3] CHEN C L, LEE T Y, JAN R M. Optimal wind-thermal coordination dispatch in isolated power systems with large integration of wind capacity[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(18): 3456-3472.
- [4] 陈海焱,陈金富,段献忠.含风电场电力系统经济调度的模糊建模及优化算法[J].电力系统自动化, 2006, 30(2): 22-26.
- [5] 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): 9-15.
- [6] 周任军,姚龙华,童小娇,等.采用条件风险方法的含风电系统安全经济调度[J].中国电机工程学报,2012,32(1): 56-63.
- [7] 薛志英,周明,李庚银.基于条件风险价值的电力系统短期充裕性决策[J].中国电机工程学报,2014, 34(1): 26-29.
- [8] 蔡德福,陈金富,石东源,等.风速相关性对配电网运行特性的影响[J].电网技术,2013,37(1): 150-155.
- [9] 蔡菲,严正,赵静波,等.基于copula理论的风电场间风速及输出功率相依结构建模[J].电力系统自动化,2013,37(17): 9-16.
- [10] 黄大为,曹康洋永,张旭鹏.基于风速相关性的风电场群汇聚效应分析[J].电工电能新技术,2016,35(2): 18-23.
- [11] 任仙玲,张世英.基于非参数核密度估计的Copula函数选择原理[J].系统工程学报,2010,25(1): 36-42.
- [12] 黎静华,文劲宇,程时杰,等.考虑多风电场出力Copula相关关系的场景生成方法[J].中国电机工程学报,2013,33(16): 30-36.
- [13] 周浩,康建伟,陈建华,等.蒙特卡罗方法在电力市场短期金融风险评估中的应用[J].中国电机工程学报,2004,24(12): 74-77.
- [14] ROCKAFELLER T, URYASEV S. Conditional value-at-risk for general loss distributions[J]. Journal of Banking and Finance, 2002, 26(7): 1443-1471.
- [15] 黎静华,韦华,莫东.含风电场最优潮流的Wait-and-See模型与最优渐进场景分析[J].中国电机工程学报,2012,32(22): 15-23.
- [16] 王靓.基于条件风险方法的含风电电力系统经济调度研究[D].长沙:长沙理工大学,2012.
- [17] 王秀云,赵宇,马万明,等.改进粒子群算法在无功优化中的应用[J].电测与仪表,2015,52(15): 108-112.
- [18] 张海峰,高峰,吴江,等.含风电的电力系统动态经济调度模型[J].电网技术,2013,37(5): 1298-1303.

收稿日期: 2017-02-13