

DOI: 10.7500/AEPS201207293

基于 Copula 理论的风电场间风速及输出功率相依结构建模

蔡 菲¹, 严 正¹, 赵静波², 冯冬涵¹, 郭 军³, 胡殿刚³

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 200240;
2. 江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏省南京市 210008; 3. 甘肃省电力公司, 甘肃省兰州市 730050)

摘要:在电力系统规划和运行中,对风能的随机相关性进行建模是获取准确结果中非常重要的环节。鉴于风速分布呈现非线性和尾部相关性模式,区别于应用较为广泛的线性相关分析,文中引入了 Copula 函数对风电场风速以及输出功率之间的相依结构进行系统建模,建立了多风电场风速及功率的联合分布函数。对甘肃酒泉地区 4 个风电场风速相依结构的研究表明,对于有一定相关性的 2 个风电场,其风速之间的相关性呈现非对称的尾部特性,单一 Copula 函数较难精准表述其相依结构,故构建混合 Copula 函数,即根据拟合优度检验选取合适的 Copula 函数的凸组合进行描述更为准确;对福建 2 个风电场输出功率相依结构的研究表明,Gumbel-Copula 适合用于 2 个风电场输出功率的相依结构建模。最后给出了四维风速的相依结构模型。

关键词:风电场; 风速; 风功率; 相关系数; Copula 函数; 混合 Copula 函数

0 引言

随着中国几个千万千瓦级风电基地的相继建成,大规模的风电逐渐并入电力系统中。由于风电基地的多个风电场地理位置比较靠近,且基本处于同一风带,风速之间具有较强的相关性^[1],使得多个风电场的总体特性不同于单个风电场的特性。若不考虑这种相关性,计算结果将出现较大误差^[2],可能会造成对系统潮流变化值和运行风险产生错误估计,因此有必要对多个风电场风速(出力)的总概率特性即联合概率分布进行刻画。

目前,研究风速相关性的文献主要侧重于风速相关性对风速模拟生成^[3]、风电出力特性分析^[4]、风电场系统的功率预测^[5]、发电可靠性评估^[6]、经济调度^[7]以及潮流计算^[8]的影响分析等,较少文献对于多风电场风速之间的相依结构进行系统建模。一般采用 Pearson 线性相关系数作为相关性量度指标,但该相关系数对相关性的刻画局限于随机变量线性相关和独立的情形,对于非线性关系则无能为力^[9]。

此外,现阶段计算多风电场风速(出力)联合概率分布的方法也较少,文献[2]利用相依概率序列运算理论计算得到 4 个风电场的总出力概率分布。文献[6]考虑机组强迫停机率、尾流效应及气温等因素对风电场出力的影响,求取了多个风电场出力的联

合概率分布,但这是在假定各风电场出力相互独立时所获得的结果。文献[10]采用 Copula 函数构建了多个随机变量的联合概率分布,选取 Normal-Copula 函数描述了海上风电场和陆地风电场出力分布的正态特性及其相互之间的线性相关程度。然而,风速分布具有不对称的厚尾特性^[11],即现有方法忽略了多个风电场风速之间的尾部相关性及单个风电场出力分布的非正态特性。因此,为了得到多个风电场的整体特性,研究并构建多个风电场风速的联合概率分布具有重要的实际意义。

Copula 理论为多风电场的相依结构建模提供了新途径。本文以甘肃酒泉 4 个风电场以及福建 2 个风电场为例,应用 Copula 函数构建风电场风速(处理)的相依结构模型,Copula 模型能够全面描述多风电场之间的相关性以及联合分布性质,为分析风电场的经济性与可靠性提供直接有效的依据。

1 Copula 理论简介

1.1 Copula 函数定义

1959 年 Sklar 定理的提出奠定了 Copula 理论的基础,Copula 函数可用于描述多元随机变量之间的相依结构,该函数将多元随机变量的联合概率分布表示为各自边缘分布的“连接”,是构建多元相关随机变量联合分布的有力工具^[12]。

Sklar 定理^[12]:设 F 是边缘分布为 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 的随机变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的联合概率分布函数。则存在一个 Copula 函数 C ,对任意 $X \in \mathbf{R}$ 有:

收稿日期: 2012-07-30; 修回日期: 2013-04-18。
国家自然科学基金资助项目(51007058);国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA050204)。

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) \tag{1}$$

如果 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 都是连续的, 则 C 是唯一的。反之, 如果 C 是一个 Copula 函数, 则由式(1)所决定的 F 是随机变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的联合概率分布。

$$C(u_1, u_2, \dots, u_n) = F(F_1^{-1}(u_1), F_2^{-1}(u_2), \dots, F_n^{-1}(u_n)) \tag{2}$$

由 Sklar 定理, 当确定了多元随机变量的边缘分布和合适的 Copula 函数后, 就可以得到这些随机变量的联合概率分布, 这也正是 Copula 函数在实际应用中的优势所在。

因此, Sklar 定理不仅证明了 Copula 函数的存在性, 还给出了建模方法, 建模过程主要分为 2 步: 第 1 步, 构建各变量的边缘分布; 第 2 步, 找到一个合适的 Copula 函数, 确定其参数作为描述各变量间相关结构的工具。

1.2 Copula 函数类型

Copula 函数主要有两大类^[12]: Ellipse-Copula 函数簇和 Archimedean-Copula 函数簇。其中前者因密度等高线投影是椭圆得名, 包括 Normal-Copula 和 t-Copula; 后者常用的 3 类函数为 Gumbel-Copula, Clayton-Copula 和 Frank-Copula。限于篇幅, 这 5 类常用的 Copula 函数的具体数学表达式以及对应的概率密度分布图见附录 A。5 类函数的特性如表 1 所示。

表 1 5 类 Copula 函数的特性

Table 1 Characteristics of five Copula functions

Copula 类型	特性
Normal-Copula	对称分布, 不反映尾部相关性
t-Copula	对称分布, 反映尾部相关性
Gumbel-Copula	非对称分布, 上尾相关, 下尾渐进独立
Clayton-Copula	非对称分布, 下尾相关, 上尾渐进独立
Frank-Copula	对称分布, 不反映尾部相关性

1.3 Copula 函数的拟合优度校验

为评估已选取的不同 Copula 函数的拟合优度, 进行 Copula 函数与经验 Copula 函数之间的拟合优度检验, 本文选用 QQ 图法和 K-S 检验法。其中, QQ 图用来观察所选取的 Copula 函数分布值与经验 Copula 函数分布值之间的距离, 若两者拟合度较高, 则 QQ 图上两者都将重合于或接近 45° 直线^[13]; 若相互偏离很远, 则表示拟合度较差。K-S 检验法的基本原理是计算实际样本数据的经验分布值 $F_n(x)$ 与 Copula 函数分布值 $G(x)$ 的最大偏差^[14],

$$Z = \max |F_n(x) - G(x)| \tag{3}$$

如果样本总体的分布和理论分布差异不明显,

相应的 Z 值应该较小, 并且 Z 越小说明偏离的程度越低, 拟合效果越好。

2 风速相依结构建模

以甘肃酒泉风电基地 4 个风电场的风速数据为例进行分析。4 个风电场分别为干河口、北大桥、桥湾及昌马风电场, 其地理位置示意分别如图 1 中数字编号 1, 2, 3, 4 所示。4 个风电场所选测风塔的测风数据的时间范围是 2008 年 5 月—2009 年 4 月整 1 年, 时间频度为 10 min, 风速测量的高度取距离轮毂最接近的 70 m 高处。

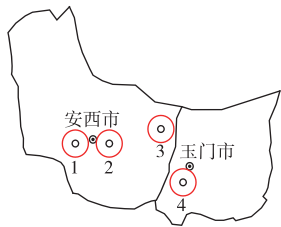


图 1 4 个风电场地理位置示意图
Fig.1 Sketch map of four wind farms' locations

2.1 风速边缘分布

用于拟合风速分布的线型有很多, 有瑞利分布、对数正态分布、双参数威布尔分布、三参数威布尔分布等, 也可以用皮尔逊曲线进行拟合。双参数威布尔分布曲线普遍被认为是适用于风速统计描述的概率函数^[15], 威布尔分布函数为:

$$F_w(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{c}\right)^k\right) \tag{4}$$

其概率密度函数可表达为:

$$P(x) = \frac{k}{c} \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{c}\right)^k\right) \tag{5}$$

式中: k 为形状参数, 无量纲; c 为尺度参数, 反映风电场的平均风速, 单位是 m/s。

根据 4 个风电场的风速数据, 对其风速分布进行威布尔分布拟合校核, 将概率分布与实际样本的经验直方图进行比较, 这 4 个风电场风速的威布尔分布拟合效果图以及形状参数和尺度参数表见附录 B。

2.2 两两风电场风速间的 Copula 建模分析

1) 线性相关性分析

选取 4 个风电场测风塔 2009 年 1 月 1 日的测风数据, 风电场风速随时间的变化曲线如图 2 所示。从图 2 容易看出, 干河口、北大桥与桥湾风电场的风速变化趋势相似程度较高, 而这 3 个风电场风速与昌马风电场风速的变化趋势差别则较大, 说明 4 个风电场之间的相关程度有所差异。表 2 给出了各风

电场风速之间的线性相关系数,是相关程度的量化结果。同时结合附录 C 给出的散点分布图,可直观看出相关程度的差异。

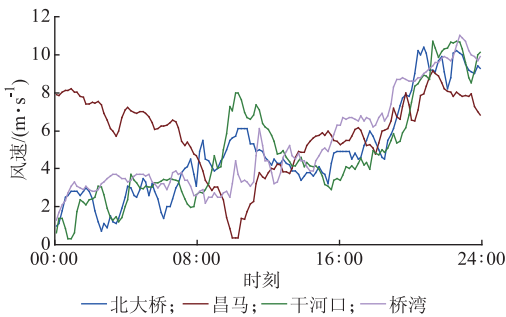


图 2 4 个风电场 2009 年 1 月 1 日风速变化曲线
Fig.2 Wind speed curves of four wind farms on January 1, 2009

表 2 4 个风电场风速之间的 Pearson 相关系数
Table 2 Pearson coefficients of each two wind speeds of four wind farms

风电场组合	相关系数	风电场组合	相关系数
(1,1)	1.000 0	(2,3)	0.658 8
(1,2)	0.822 3	(2,4)	0.381 1
(1,3)	0.564 4	(3,3)	1.000 0
(1,4)	0.328 5	(3,4)	0.630 2
(2,2)	1.000 0	(4,4)	1.000 0

参照图 1 所示各风电场地理位置以及附录 C 中两两风电场风速之间的散点分布图,1 号与 2,3,4 号风电场之间的相隔距离依次增加,且 1 号与 2 号风电场在地理位置上接近于东西平行的方向,因此在东西风向盛行的酒泉地区,二者风况有较大的相似性,如附录 C 图 C2(a)所示,散点集中趋向于 45° 对角线,即线性相关性较强;1 号和 3 号风电场虽然在地理位置上也接近于东西平行的方向,但由于二者距离相对更远,因此线性相关性有所减弱,在附录 C 图 C2(b)中体现为散点有所发散;1 号和 4 号风电场距离最远,相关性也最弱,如附录 C 图 C2(c)所示;3 号和 4 号风电场在地理位置上接近于南北垂直的方向,由于二者距离较近,风况也较为相似,因此有一定的线性相关性,如附录 C 图 C2(d)所示。

以上部分皆属于线性相关内容,下面引入 Copula 函数构建多风电场风速之间的相依结构,得到风速之间的相关性以及联合分布函数。

2) Copula 模型选择

由 1.2 节表 1 和附录 A 图 A1 可知,常见的 5 类二元 Copula 函数具有不同的特性,而通常选取 Copula 最简单的方法是通过画变量的散点图或二元直方图来进行选择。图 3 给出了两两风电场风速间的二元直方图,从每个直方图中均可初步判断风速之间的相关性具有非对称的上后尾特性。

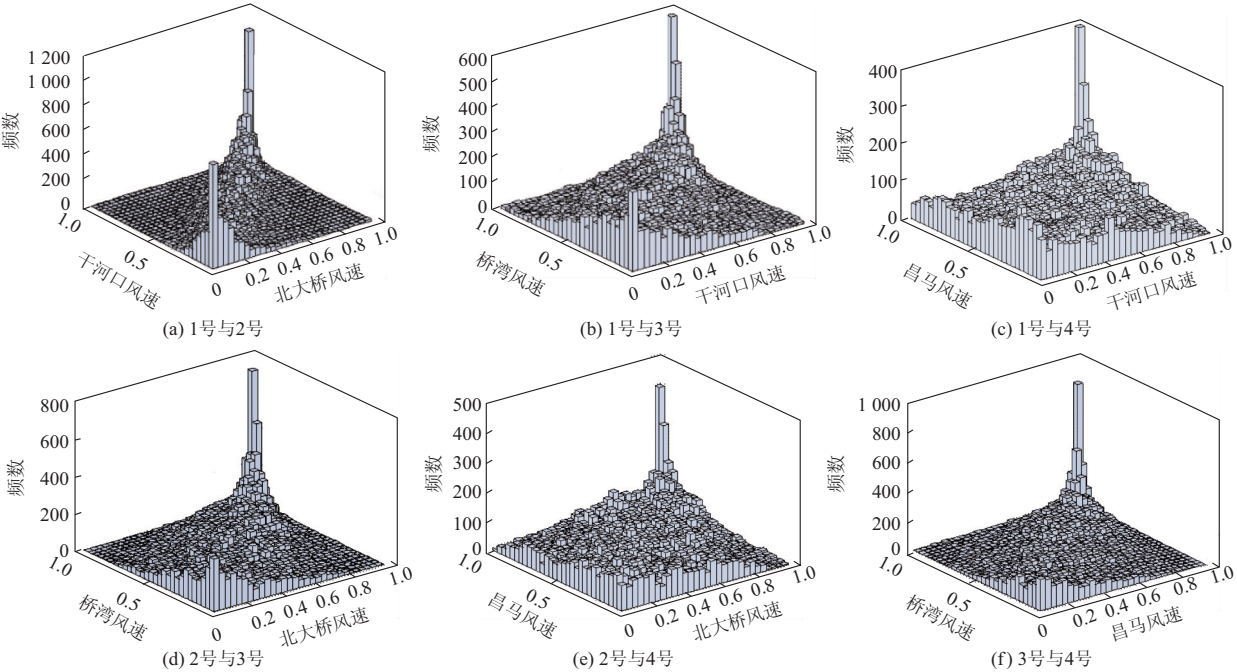


图 3 两两风电场风速间的二元直方图
Fig.3 Binary histograms of each two wind speeds of four wind farms

3) Copula 参数估计

Copula 函数中变量的边缘分布 u_i 为服从 $[0, 1]$ 上的均匀分布,故首先对风速的边缘分布作概率积分变换,即 $u_i = F(x_i)$ 。此外由于 Copula 函数本身就是一个分布函数,故采用两阶段极大似然法对其未知参数进行估计。方法步骤如下^[16]。

$$l(\theta) = \sum_{i=1}^T \ln(c(F_1(x_1, \theta_1), F_2(x_2, \theta_2); a) + \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^2 \ln f_i(x_i; \theta_i) \tag{6}$$

第 1 步:

$$\hat{\theta}_i = \arg \max \sum_{i=1}^T \ln f_i(x_i; \theta_i) \tag{7}$$

第 2 步:

$$\hat{a} = \arg \max \sum_{i=1}^T \ln(c(F_1(x_1, \theta_1), F_2(x_2, \theta_2); a) \tag{8}$$

由以上方法对两两风电场风速之间的 6 种组合下的每类 Copula 函数进行参数估计,估计结果如表

3 所示。

表 3 5 类 Copula 函数风速参数估计值
Table 3 Parameter estimation of five Copula functions for wind speed

风电场组合	ρ_t	k	ρ_{Norm}	θ_{Gumbel}	θ_{Frank}	θ_{Clayton}
(1,2)	0.866 7	2.576 2	0.822 3	2.971 6	10.607 0	2.105 1
(1,3)	0.587 2	8.070 9	0.564 4	1.638 4	4.446 6	0.788 9
(1,4)	0.342 4	16.646 8	0.328 5	1.261 6	2.101 6	0.356 7
(2,3)	0.675 4	9.536 5	0.658 8	1.869 4	5.390 7	0.986 8
(2,4)	0.392 8	32.778 4	0.381 1	1.311 7	2.472 7	0.425 2
(3,4)	0.645 5	8.448 9	0.630 2	1.792 1	4.983 8	0.891 1

4) 拟合优度检验

依据 1.3 节理论,采用图形法和统计分析法初步选择最优拟合的 Copula 函数。

①图形法。利用 QQ 图对 Copula 函数与经验 Copula 函数进行拟合,由于 QQ 图数量较多,仅以 1 号和 2 号风电场风速建模为例,拟合效果如图 4 所示。

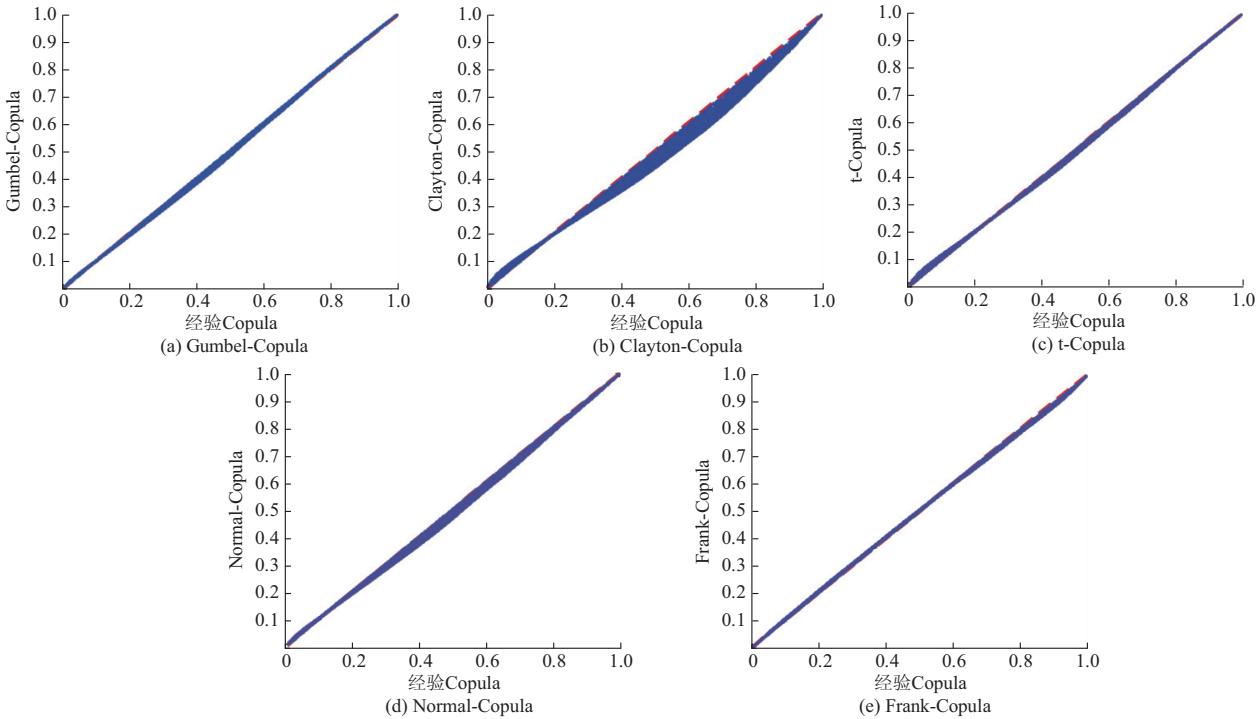


图 4 5 类 Copula 函数与经验 Copula 函数的 QQ 图
Fig.4 QQ diagrams between each of five Copula functions and empirical Copula function

根据 QQ 图可以看出,各类 Copula 函数差别不很明显,其中 Gumbel-Copula, Frank-Copula, t-Copula 函数曲线均较为接近 45° 曲线,拟合效果相对较好。为了得到拟合程度的微妙差别,以下采用统计分析法。

②统计分析法。采用 K-S 检验法计算检验统计量 Z 值,结果如表 4 所示。

表 4 两两风电场风速之间的 Pearson 相关系数
Table 4 Pearson coefficient of wind speeds
of each two wind farms

风电场 组合	Z 统计值				
	Normal- Copula	t-Copula	Clayton- Copula	Frank- Copula	Gumbel- Copula
(1,2)	0.031 3	0.022 0	0.071 8	0.017 4	0.016 9
(1,3)	0.023 9	0.022 0	0.056 8	0.020 7	0.012 4
(1,4)	0.016 7	0.016 1	0.034 9	0.014 8	0.016 2
(2,3)	0.069 1	0.067 1	0.094 1	0.061 3	0.070 7
(2,4)	0.023 8	0.021 9	0.055 7	0.020 3	0.010 4
(3,4)	0.027 2	0.019 1	0.059 3	0.021 2	0.015 7

从表 4 结果同样可以看出,6 种组合中 Frank-Copula, Gumbel-Copula 以及 t-Copula 函数的 Z 值相对较小,而 Normal-Copula 和 Clayton-Copula 的 Z 值相对更大。

以上 2 种检验方法说明,单一的 Copula 函数簇较难精准描述甘肃酒泉风电场风速的相依结构模型,故在此引入混合 Copula 函数进行建模。

5)混合 Copula 函数

通过拟合优度检验方法选取了 3 种较为合适的 Copula 函数,为了更准确地描述甘肃酒泉风电场风速间的相依结构,在此构造混合 Copula 函数。该函数是 Gumbel-Copula, Frank-Copula 和 t-Copula 的线性凸组合,所构造的混合 Copula 函数仍然是 Copula 函数^[12],其具体形式如下:

$$C(u, v; a) = w_1 C_{\text{Gumbel}}(u, v; \theta_1) + w_2 C_{\text{Frank}}(u, v; \theta_2) + w_3 C_t(u, v; \theta_3) \quad (9)$$

式中:参数 $w_1, w_2, w_3 \in [0, 1]$,为模型的形状(权重)参数,且 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$; $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 为模型的相依参数; $C_{\text{Gumbel}}(u, v; \theta_1), C_{\text{Frank}}(u, v; \theta_2), C_t(u, v; \theta_3)$ 的具体表达式分别见附录 A 式(A5)、式(A6)和式(A3)。

以 1 号和 2 号风电场风速为例,采用最大期望(EM)算法^[17]估计式(9)中的参数,结果如表 5 所示。

表 5 混合 Copula 函数风速参数估计
Table 5 Parameter estimation of mixed
Copula function for wind speed

Coupla 函数	θ	w
t-Copula	0.775 7	0.463
Gumbel-Copula	3.472 4	0.505
Frank-Copula	15.811 0	0.033

把表 5 中的参数估计值代入式(9),便可得到完整的混合 Copula 函数。由权重参数结果可知, Gumbel-Copula 所占比重最大, t-Copula 其次,而 Frank-Copula 的权重系数几乎为 0,再次说明了用单个 Copula 函数对风速的相关性结构进行阐述具有一定的局限性,而用 Gumbel-Copula, Frank-

Copula 和 t-Copula 构造的混合 Copula 函数则能够同时捕捉到上尾、下尾相关性。由公式 $\lambda_{\text{C}}^{\text{U}} = 2 - 2^{\frac{1}{\theta}}$ 计算得到混合 Copula 的上尾相关系数为 0.776,说明此案例中两两风电场风速之间具有较强的上尾相关性。这样得到的混合 Copula 函数不仅较为准确地刻画了两风电场风速的相关程度,而且能够准确地捕捉到风电场之间的各种相关模式。

此外对混合 Copula 以及单个 Copula 函数进行拟合优度检验,结果如表 6 所示。可以看出, Gumbel-Copula 和 t-Copula 以及混合 Copula 能够通过拟合优度检验,同时混合 Copula 的统计量最小,拟合效果最好。

表 6 不同 Copula 函数检验比较
Table 6 Comparison of different Copula functions

Copula 函数	参数	参数估计值	K-S 检验 统计量	P 值
t-Copula	θ_1	0.866 7	0.022 0	0.27
Gumbel-Copula	θ_2	2.971 6	0.016 9	0.36
Frank-Copula	θ_3	10.607 0	0.017 4	0
混合 Copula	w_1	0.462 6	0.015 7	0.45
	w_2	0.504 8		
	w_3	0.032 7		
	θ_1	0.775 7		
	θ_2	3.472 4		
	θ_3	15.811 0		

3 风电场输出功率相依结构建模

以福建漳浦六鳌和龙源 2 个风电场的输出功率为例,说明利用 Copula 函数构建风电场输出功率间相依结构模型的过程。数据为来自 2 个风电场 2008 年 12 月 9—15 日的发电出力同步测量数据,时间分辨率为 15 min,每个风电场数据量为 672 个。2 个风电场输出功率概率密度分布如图 5 所示。由图可以看出,输出功率的概率密度分布规律性不强,难以直接用数学表达式来表示^[18]。故引入非参数估计法中的经验分布函数法对输出功率的边缘分布进行拟合,即求取经验分布函数作为总体分布的近似,该方法不需要任何概率分布形式的假设。在已知风电功率实测数据的情况下,求得 2 个风电场的经验分布函数如图 6 所示。

附录 C 图 C2 以散点图的形式给出了六鳌和龙源 2 个风电场输出功率的联合概率分布。由于 2 个风电场地理位置相距较近,从散点图可以直观看出, 2 个风电场的输出功率之间具有较强的相关性。

1) Copula 模型的构建

首先利用经验分布函数,将原始风电功率数据转换为[0,1]区间上的概率分布值。其次采用极大似然法估计选定 Copula 函数的参数,结果为 $\rho_{\text{t}} = 0.786 2, k = 20, \rho_{\text{Norm}} = 0.725 3, \theta_{\text{Gumbel}} = 2.187 5, \theta_{\text{Frank}} = 6.484 3, \theta_{\text{Clayton}} = 1.912 3$ 。

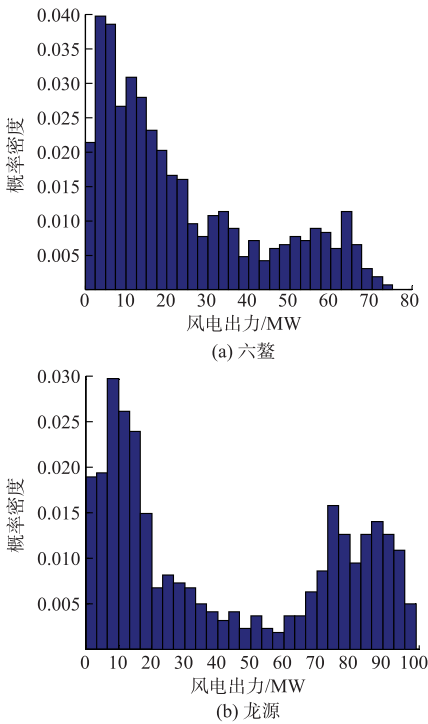


图 5 2 个风电场输出功率概率密度分布
Fig.5 Probability density distribution of output power of two wind farms

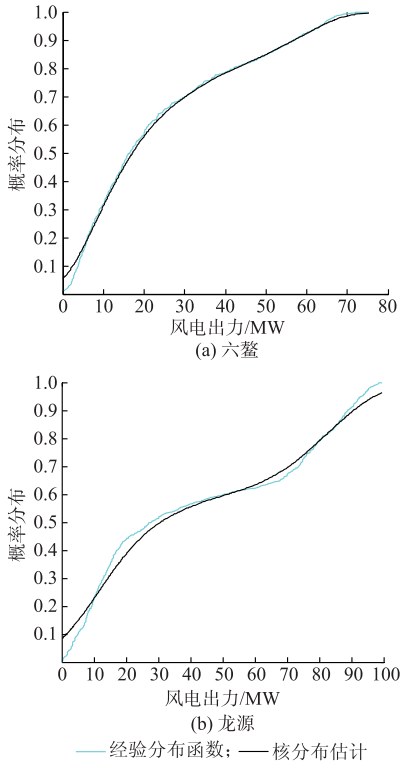


图 6 2 个风电场输出功率的经验分布函数
Fig.6 Empirical distribution function of output power of two wind farms

2) 拟合优度检验

类似风速建模的拟合优度检验,对功率的 5 类 Copula 函数进行图形和统计检验,结果为 $Z_{\text{Norm}} = 0.040\ 6$, $Z_t = 0.049\ 7$, $Z_{\text{Clayton}} = 0.068\ 7$, $Z_{\text{Frank}} = 0.039\ 8$, $Z_{\text{Gumbel}} = 0.033\ 6$ 。QQ 图检验结果与上述结果一致,鉴于篇幅,此处略去。可以看出, Gumbel-Copula 最适合用于本案例中 2 个风电场间输出功率的相依结构建模。

考虑到风电场输出功率调控策略或行为差异的影响,分析结果有可能存在一定误差,但是文献[2]采用风电输出功率作为变量进行的相依结构建模结果证实,只要对功率数据进行标么化或归一化处理,所得到的相依结构也是可行的。

4 四维风速相依结构建模

依据附录 A 式(A2)给出的多维 Normal-Copula 分布函数,构建 4 个风电场间风速的相依结构模型,采用 MATLAB 编程计算得到等效相依系数矩阵:

$$\rho_{\text{Norm}} = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.82 & 0.56 & 0.33 \\ 0.82 & 1.00 & 0.66 & 0.38 \\ 0.56 & 0.66 & 1.00 & 0.63 \\ 0.33 & 0.38 & 0.63 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, ρ_{Norm} 的第 1 行和第 1 列分别对应图 1 中的 1, 2, 3, 4 号风电场,该矩阵为对称矩阵,对角元素全为 1,且通过验算为正定矩阵,这样 4 个风电场风速的相依结构可被唯一确定,得到风速的联合分布函数如下:

$$F_{\text{Norm}}(x_1, x_2, x_3, x_4) = \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u_1)} \dots \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u_4)} \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N}{2}} |\rho_{\text{Norm}}|^{\frac{1}{2}}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \mathbf{x}^T \rho_{\text{Norm}}^{-1} \mathbf{x}\right) d\mathbf{x} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ 。

但是根据 Copula 函数的特性, Normal-Copula 函数不能反映尾部相关性(多个随机变量同时为极值的关联程度)。例如,在文献[19]中,采用 Normal-Copula 函数建模时,无论相关系数值如何,只要涉及到尾部相关性,极端事件都体现为彼此相互独立。而 t-Copula 能够反映尾部相关性,除非自由度 $k \rightarrow \infty$, 相关系数 $\rho_i \neq 1$, 则尾部相关系数为 0, 此时 t-Copula 才会与 Normal-Copula 函数相同^[20]。因此, t-Copula 函数比 Normal-Copula 函数更加适合用于风速相依结构建模。同样根据极大似然估计法得到 t-Copula 函数的等效相依系数矩阵如下:

$$\rho_t = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.87 & 0.60 & 0.35 \\ 0.87 & 1.00 & 0.67 & 0.39 \\ 0.60 & 0.67 & 1.00 & 0.64 \\ 0.35 & 0.39 & 0.64 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (12)$$

该矩阵同样为对角元素全为 1 的对称矩阵,且为正定矩阵。自由度 k 计算结果为 $k=6.57 \approx 7$,由此得到风速的联合分布函数如下:

$$F_t(x_1, x_2, x_3, x_4) = \int_{-\infty}^{t^{-1}(u_1)} \dots \int_{-\infty}^{t^{-1}(u_4)} \frac{\Gamma\left(\frac{k+N}{2}\right) |\rho_t|^{-\frac{1}{2}}}{\Gamma\left(\frac{k}{2}\right) (k\pi)^{\frac{N}{2}}} \cdot \left(1 + \frac{1}{k} \mathbf{x}^T \rho_t^{-1} \mathbf{x}\right)^{\frac{k+N}{2}} d\mathbf{x} \quad (13)$$

5 结论

本文引入 Copula 理论对甘肃酒泉地区 4 个风电场风速间以及福建 2 个风电场输出功率间的相依结构进行建模,主要结论如下。

1)在甘肃酒泉地区,随着风电场之间的相隔距离与所处方位的不同,两两风电场风速之间的相关程度有所不同,主要随距离增加相关程度减弱。

2)酒泉地区两两风电场风速之间的分布呈现非对称的上厚尾特性,经检验得出 Gumbel-Copula 等 3 种函数较为适合用于建模,为了更准确地得到风速的相依结构,采用混合 Copula 函数进行建模效果最佳。

3)对于福建 2 个风电场输出功率间的相依结构建模,采用 Gumbel-Copula 函数较为适合。

后续工作将致力于采用其他方法构建多维随机变量相依结构的研究,并将得到的联合概率分布函数应用于电力系统可靠性评估以及风险分析等领域。

附录见本刊网络版 (<http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

[1] WAN Y H, MILLIGAN M, PARSONS B. Output power correlation between adjacent wind power plants[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2003, 125(4): 551-555.

[2] 张宁,康重庆.风电出力分析中的相依概率性序列运算[J].清华大学学报:自然科学版,2012,52(5):23-26.

ZHANG Ning, KANG Chongqing. Dependent probabilistic sequence operations for wind power output analysis[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2012, 52(5): 23-26.

[3] 王松岩,于继来,李海峰,等.考虑统计和互相关特性的多风电场

风速数据模拟生成方法[J].电力系统自动化,2013,37(6): 18-23.

WANG Songyan, YU Jilai, LI Haifeng, et al. A wind speed modeling method for multiple wind farms considering correlation and statistical characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 18-23.

[4] 肖创英,汪宁渤,眭晶,等.甘肃酒泉风电出力特性分析[J].电力系统自动化,2010,34(17):64-67.

XIAO Chuangying, WANG Ningbo, ZHI Jing, et al. Power characteristics of Jiuquan wind power base[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 64-67.

[5] ALEXIADIS M C, DOKOPOULOS P S, SAHSAMANOGLU H S. Wind speed and power forecasting based on spatial correlation models [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 14(3): 836-842.

[6] 陈树勇,戴慧珠,白晓民,等.风电场的发电可靠性模型及其应用[J].中国电机工程学报,2000,20(3):26-29.

CHEN Shuyong, DAI Huizhu, BAI Xiaomin, et al. Reliability model of wind power plants and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 26-29.

[7] VILLANUEVA D, FEIJOO A, PAZOS J L. Simulation of correlated wind speed data for economic dispatch evaluation[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 142-149.

[8] 范荣奇,陈金富,段献忠,等.风速相关性对概率潮流计算的影响分析[J].电力系统自动化,2011,35(4):18-22.

FAN Rongqi, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong, et al. Impact of wind speed correlation on probabilistic load flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 18-22.

[9] BOYER B H, GIBSON M S, LORETAN M. Pitfalls in tests for changes in correlations[R/OL]. [2012-09-13]. <http://www.federalreserve.gov/Pubs/ifdp/1997/597/ifdp597.pdf>.

[10] PAPAETHYMIU G, KUROWICKA D. Using Copulas for modeling stochastic dependence in power system uncertainty analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(1): 140-149.

[11] YEHAND T H, WANG L. A study on generator capacity for wind turbines under various tower heights and rated wind speeds using Weibull distribution[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2008, 23(2): 592-602.

[12] NELSEN R B. An introduction to Copulas[M]. 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2006.

[13] 张金清,李徐.资产组合的集成风险度量及其应用一:基于最优拟合 Copula 函数的 VaR 方法 [J].系统工程理论与实践, 2008(6):14-21.

ZHANG Jinqing, LI Xu. Portfolio integrated risk measurement and its application—VaR method based on goodness-of-fit Copula functions [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2008(6): 14-21.

[14] WANG X, MAKIS V. Autoregressive model-based gear shaft fault diagnosis using the Kolmogorov-Smirnov test[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 327(3): 413-423.

[15] 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 the algorithm to the probabilistic distribution parameters of wind speed in wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 107-110.

[16] 张义斌, 王伟胜. 风电场输出功率的概率分布及其应用[J]. 电力设备, 2004, 5(8): 38-40.
ZHANG Yibin, WANG Weisheng. Probability distribution of power output for wind power field and its application[J]. Electrical Equipment, 2004, 5(8): 38-40.

[17] ROMANO C. Calibrating and simulating Copula functions: an application to the Italian stock market [R]. Rome, Italy: Capitalia, 2002.

[18] EMBRECHTS P, MCNEIL A, STRAUMANN D. Correlation and dependence in risk management: properties and pitfalls// Risk Management: Value at Risk and Beyond[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002: 176-223.

[19] 刘志东. 度量收益率的实际分布和相关性对资产组合选择绩效

的影响[J]. 系统管理学报, 2007, 16(6): 628-635.
LIU Zhidong. The effect of measuring the actual distribution and dependence on portfolio selection performance[J]. Journal of System & Management, 2007, 16(6): 628-635.

[20] DEMPSTER A P, LAIRD N M, RUBIN D B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 1977, 39(1): 1-38.

蔡 菲(1987—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向: 新能源、电力系统优化运行。E-mail: ccscop@yeah.com

严 正(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统优化运行及电力系统稳定分析。E-mail: zhengyan_sjtu@yahoo.com.cn

赵静波(1982—), 男, 硕士, 主要研究方向: 电力系统计算和分析。E-mail: zhaojb1@js.sgcc.cn

(编辑 翟晶晶)

Dependence Structure Models for Wind Speed and Wind Power
Among Different Wind Farms Based on Copula Theory

CAI Fei¹, YAN Zheng¹, ZHAO Jingbo², FENG Donghan¹, GUO Jun³, HU Diangang³

- (1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Electric Power Research Institute of Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210008, China;
3. Gansu Electric Power Corporation, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In the operation and planning of power systems, it is important to model the dependence of random wind energy in order to get accurate results. Different from the widely used linear correlation analysis, the Copula function is introduced for modeling the dependence structure of wind speed and wind power among different wind farms, and the joint distribution functions of wind speed and wind power are established respectively. By studying the actual wind speed data from four wind farms in Jiuquan of Gansu province, it is found that wind speed correlation between each two wind farms shows unsymmetrical thick tail characteristic. As this phenomenon cannot be described by a single kind of Copula function, a mixed Copula function, i.e. convex combination of some single Copula functions, is constructed based on selecting the candidate single Copula functions according to goodness of fit test. By studying the actual wind power data from two wind farms in Fujian province, it is found that Gumbel-Copula function is suitable for modeling the dependence structure between output power of two wind farms. A four-dimensional dependence structure model for wind speed is finally presented.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51007058) and National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2012AA050204).

Key words: wind farms; wind speed; wind power; correlation; Copula function; mixed Copula function