

DOI: 10.7667/PSPC180149

基于动态 Copula 的风光联合出力建模及动态相关性分析

段偲默¹, 苗世洪¹, 霍雪松², 李力行¹, 韩 佳¹, 晁凯云¹

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院强电磁工程与新技术国家重点实验室, 电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 江苏电力调度控制中心, 江苏 南京 210000)

摘要: 准确描述风力发电和光伏发电的动态相关性及联合出力的波动性, 对风光互补系统的出力预测和经济调度具有重要意义。针对现行静态相关系数无法准确描述风光出力相依关系的问题, 研究了风光出力的动态相关性, 提出了基于动态 Copula 函数的风光联合出力模型构建方法。结合实测数据建立了 8 组动态与静态的风光联合出力 Copula 模型, 用动态相关系数描述风光出力的相关性。运用拟合优度检验方法验证了动态 Copula 模型对比其静态模型的优越性, 选出最优模型。最后将该模型应用在数据驱动的风光联合系统中, 验证了其合理性与正确性。

关键词: Copula 理论; 动态 Copula 函数; 风光互补; 相关系数; 拟合优度

Modeling and dynamic correlation analysis of wind/solar power joint output based on dynamic Copula

DUAN Simo¹, MIAO Shihong¹, HUO Xuesong², LI Lixing¹, HAN Ji¹, CHAO Kaiyun¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Jiangsu Electric Power Dispatch Center, Nanjing 210000, China)

Abstract: Describing the dynamic correlation of wind/solar power output and the fluctuation of joint output accurately are of great significance to the output forecasting and economic dispatch of the wind solar hybrid system. According to the problem that the existing static correlation coefficient cannot accurately describe the relationship between the wind power and PV output, this paper studies dynamic correlation of wind/solar power output and proposes a wind/solar power joint output model construction method by using dynamic Copula function. Combining with the measured data, it establishes 8 groups of wind/solar power joint output model, applies dynamic correlation coefficient to describe dynamic correlation of wind/solar power output and uses goodness of fit method to prove the superiority of the dynamic Copula model comparing to the static model to select the optimal model. Finally, the model is applied to the data driven wind/solar joint system, and the rationality and correctness of the model are verified.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902600), Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGJS0000DKJS1700840), and National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2015CB251301).

Key words: Copula method; dynamic Copula function; wind/solar hybrid; correlation coefficient; goodness of fit

0 引言

近年来, 我国新能源装机容量逐年增加, 装机总量居世界第一, 消纳总量实现了快速增长。随着新能源渗透率的不断提高, 消纳矛盾也逐渐凸显,

如何减少弃风、弃光, 成为学术研究的焦点问题^[1-3]。文献[4-9]强调了风电场、光伏电站等间歇式能源动态特性建模验证工作的重要性, 对风光出力动态特性的描述方法提出了更高的要求。

Copula 函数因能刻画变量间的非线性相关性, 易于构造联合分布模型而具有独特的优势, 在金融领域应用广泛, 近年来也被引入可再生能源的相关性和波动性分析中, 特别是风电场出力分析中^[10-11]; 文献[12-13]将椭圆族 Copula 函数应用到风电场的

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0902600); 国家电网公司科技项目(SGJS0000DKJS1700840); 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2015CB251301)

出力相关性分析中,构建了基于 Copula 理论的风速相关性模型,并分别应用到电力系统不确定性分析和概率最优潮流分析中。但椭圆族 Copula 函数只能刻画变量间对称的尾部相关性,模型拟合优度和分析准确度受到限制。文献[14-15]利用阿基米德族 Copula 函数对多风电场联合出力进行建模,并与基于正态 Copula 函数的模型进行对比,证明阿基米德族 Copula 函数能更好地刻画其相关性;对于不同区域的风电场,出力相关特性存在差别,单独一种 Copula 函数不能适合所有情况,存在优选的问题,文献[16]提出根据拟合优度选取最佳 Copula 模型的凸组合描述方法;上述文献运用 Copula 理论,逐步提高了多风电场联合出力 Copula 模型的拟合优度,但未考虑风电出力相关性的动态特性。文献[17]采用动态 Copula 函数对风电出力相关性进行了分析,建立了风电出力的动态 Copula 模型,但未介绍动态模型的构建方法,也未分析动态相关系数与联合出力的关系。以上文章仅讨论多风电场的出力非线性相关性,没有研究光伏出力和风电出力的非线性相关性。

文献[18-19]提出了利用 Copula 理论建立风光联合出力概率分布模型的方法,但未考虑相关系数的动态特性。文献[20]在建立了风光联合出力 Copula 模型后,对相关系数进行分析,指出在不同季节、不同天气情况下相关系数是不同的。

综上所述,有效刻画风光联合出力的动态相关特性是风光联合出力模型构建的重点研究方向。本文提出基于动态 Copula 理论的风光联合出力相关性研究,设计了适合风光出力数据的动态 Copula 模型构建方法,利用动态 Copula 函数族构建风光联合出力模型,比较 8 种 Copula 函数模型的拟合优度并选出最优模型,同时证明了动态 Copula 模型对比其静态模型的明显优越性。最后将最优模型应用到数据驱动的风光联合系统中,比较动态相关系数与总出力的对应关系,验证了其合理性与正确性。

1 动态 Copula 理论

1.1 Sklar 定理

Sklar 在 1959 年提出了 Sklar 定理,定理指出一个 N 维分量的联合分布函数可以由这 N 个变量的边缘分布和一个 Copula 函数来描述^[21]。Sklar 定理不仅证明了 Copula 函数的存在性,还提出了建立 Copula 函数模型的方法,为 Copula 理论的建立奠定了基础。

Copula 函数用于描述变量间的非线性相关性,基于 Copula 函数的联合分布函数和联合密度函数

表达式分别为

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C(F(x_1), F(x_2), \dots, F(x_n)) \quad (1)$$

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c(f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)) \cdot \prod_{n=1}^N f_n(x_n) \quad (2)$$

式中, $F(x_n)$ 和 $f(x_n)$ 分别为变量边缘分布的分布函数和密度函数。

Copula 分布函数 $C(F(x_1), F(x_2), \dots, F(x_n))$ 与 Copula 密度函数 $c(f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n))$ 的关系为

$$c(f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)) = \frac{\partial^n C(F(x_1), F(x_2), \dots, F(x_n))}{\partial F(x_1) \partial F(x_2) \dots \partial F(x_n)} \quad (3)$$

由式(1)、式(2)可知,联合分布函数即为选取的 Copula 函数,而联合密度函数即为选取的密度函数与各边缘分布的积。

1.2 Copula 函数

Copula 函数主要分为椭圆函数族和阿基米德函数族两大类,前者包括正态 Copula 函数和 t-Copula 函数,后者常用的有 Gumbel-Copula 函数、Clayton-Copula 函数和 Frank-Copula 函数^[22]。不同类型的 Copula 函数具有不同的函数结构,其尾部特征也不相同,适用于刻画不同类型的相依关系。

考虑到同一地区风光出力非线性相关性的特征,本文采用 Patton 提出的 4 种动态 Copula 函数^[23-24],包括动态正态 Copula(N-Copula)函数、动态 t-Copula 函数、动态 Clayton-Copula(C-Copula)函数、动态 Symmetrized Joe-Clayton Copula(SJC-Copula)函数及 Engle 提出的 DCC 方法^[25],构建同一区域风光联合出力的动态 Copula 模型。文中使用的 Copula 函数表达式如下。

1) 动态 Clayton-Copula

动态 C-Copula 函数的结构同 Clayton-Copula 函数,二维情况下表达式为

$$C_C(u, v) = \max[(u^{-\theta_{C,t}} + v^{-\theta_{C,t}} - 1)^{-1/\theta_{C,t}}, 0] \quad (4)$$

式中: u 、 v 为边缘分布函数; $\theta_{C,t}$ 为动态相关系数。

2) 动态 SJC-Copula

动态 SJC-Copula 函数由动态 Joe-Clayton Copula(JC-Copula)函数变换而来,表征 SJC-Copula 函数和 JC-Copula 函数变换关系的函数表达式为

$$C_{SJC}(u, v | \tau_t^U, \tau_t^L) = \frac{1}{2} [C_{JC}(u, v | \tau_t^U, \tau_t^L) + C_{JC}(1-u, v | \tau_t^U, \tau_t^L) + u + v - 1] \quad (5)$$

二维情况下动态 Joe-Clayton Copula 函数的表达式为

$$C_{JC}(u, v | \tau_t^U, \tau_t^L) = 1 - \{1 - \{[1 - (1 - u^{\kappa_t})]^{-\gamma_t} + [1 - (1 - v^{\kappa_t})]^{-\gamma_t} - 1\}^{-1/\gamma_t}\}^{1/\kappa_t} \quad (6)$$

式中: $\kappa_t = 1 / \log_2(2 - \tau_t^U)$; $\gamma_t = -1 / \log_2(\tau_t^L)$; u 、 v 为边缘分布函数; τ_t^U 、 τ_t^L 分别为动态上、下尾相关系数。

3) 动态 N-Copula 和动态 t-Copula

动态 N-Copula、t-Copula 函数结构类似, 在二维情况下表达式分别为

$$C_N(u, v | \rho_{N,t}) = \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u)} \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(v)} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_{N,t}^2}} \cdot \exp\left(-\frac{s^2 - 2\rho_{N,t}sr + r^2}{2(1-\rho_{N,t}^2)}\right) ds dr \quad (7)$$

$$C_t(u, v | \rho_{t,t}, k_t) = \int_{-\infty}^{\Phi_k^{-1}(u)} \int_{-\infty}^{\Phi_k^{-1}(v)} \left[\frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_{t,t}^2}} \cdot \exp\left(-\frac{s^2 - 2\rho_{t,t}sr + r^2}{2(1-\rho_{t,t}^2)}\right) \right]^{-(k_t+2)/2} ds dr \quad (8)$$

式中: u 、 v 为边缘分布函数; $\rho_{N,t}$ 、 $\rho_{t,t}$ 为动态相关系数; k_t 为自由度。

2 模型构建和评价方法

为有效体现风光出力的相关性, 防止容量较小电场的出力数据淹没在大电场的出力数据中, 同时符合 Copula 函数的定义要求, 本文将风电出力和光伏出力数据序列进行标幺化处理, 得到风电出力标幺化序列 w_t 和光伏出力标幺化序列 s_t 。

2.1 静态相关系数估计

确定 Copula 函数分布特性的关键在于相关系数的估计, 而联合分布相关系数的求取依赖于边缘分布函数的形式。根据边缘分布函数的选取方法的不同, 常用的几种 Copula 函数相关系数估计方法有两阶段估计法(IFM)、基于经验分布函数的极大似然估计法(CML)和基于非参数核密度的极大似然估计法(MLK)^[26]。

其中, MLK 属于半参数估计法, 不需要估计边缘分布中的未知参数, 因此估计效果不依赖边缘分布的拟合优度。在风光出力这类数据总量较大、无法获得确切边缘分布函数的情况下, 选用 MLK 进行参数估计的误差最小, 效果最为理想^[26], 本文因此采用 MLK 进行参数估计。

MLK 方法核心思想是用各变量的非参数核密度估计函数代替其边缘分布函数。利用非参数核密度估计法将 w_t 、 s_t 转化为风电出力概率密度函数 $f_w(x_1)$ 、光伏出力概率密度函数 $f_s(x_2)$, 其表达式

分别为

$$f_w(x_1) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T K_h(x_1 - w_t) \quad (9)$$

$$f_s(x_2) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T K_h(x_2 - s_t) \quad (10)$$

式中: K_h 为核函数; T 为序列容量。对于静态 Copula 函数, 将边缘分布函数 $f_w(x_1)$ 、 $f_s(x_2)$ 代入似然函数, 求取似然函数的极值点即可求出其相关系数, 似然函数表达式为

$$L(\theta) = \sum \ln c(f_w(x_1), f_s(x_2)) \quad (11)$$

$$\hat{\theta} = \arg \max L(\theta) \quad (12)$$

式中, $\hat{\theta}$ 即为待求的静态相关系数。

2.2 动态相关系数估计

在动态 Copula 模型中, 对相关系数的估计转化为对演进方程参数的估计。由于篇幅限制, 本文以动态 C-Copula 模型为例介绍动态相关系数的估计方法, 其他模型类似。

利用非参数核密度估计方法, 将风电出力序列 w_t 、 s_t 代入动态 C-Copula 函数的演进方程, 其表达式为

$$\theta_{C,t} = \tilde{\Lambda}(\omega + \beta\theta_{C,t-1} + \alpha \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} |w_{t-j} - s_{t-j}|) \quad (13)$$

式中: ω 、 β 、 α 为待估计的参数; $\tilde{\Lambda}(x) \equiv (1 - e^{-x}) / (1 + e^{-x})$ 为 logistic 函数, 引入此函数保证 $\theta_{C,t} \in (-1, 1)$ 。

演进方程将静态的 θ 变为动态的 $\theta_{C,t}$, 而对应的似然函数也从相关系数 θ 的函数变为演进方程系数 ω 、 β 、 α 的函数。求解该似然函数即可求得对数极大似然估计值 $\text{Log}L$ 和对应的 ω 、 β 、 α 。将 ω 、 β 、 α 及 w_t 、 s_t 代入演进方程, 即可求得动态相关系数序列 $\theta_{C,t}$ 。

动态 C-Copula 模型的演进特性类似于有限制条件的 ARMA(1,10)模型, 参数 β 控制相关系数的递进关系, 参数 α 控制前 10 组数据对相关系数的影响。动态 C-Copula 函数具有不对称的尾部特征, 下尾高, 上尾低, 对联合出力在分布下尾处的变化比较敏感, 即对风光出力较小时的相关特性进行有效刻画。

动态 SJC-Copula 函数的分布特性由上尾相关系数 τ_t^U 和下尾相关系数 τ_t^L 刻画, 其演进方程分别为

$$\tau_t^U = \tilde{\tilde{\Lambda}}(\omega_U + \beta_U \tau_{t-1}^U + \alpha_U \cdot \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} |w_{t-j} - s_{t-j}|) \quad (14)$$

$$\tau_t^L = \tilde{\tilde{\Lambda}}(\omega_L + \beta_L \tau_{t-1}^L + \alpha_L \cdot \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} |w_{t-j} - s_{t-j}|) \quad (15)$$

式中： ω_U 、 β_U 、 α_U 和 ω_L 、 β_L 、 α_L 分别为待估计的上尾参数和下尾参数； $\tilde{\Lambda}(x) \equiv (1 + e^{-x})^{-1}$ 是 logistic 函数，保证 τ_i^U 、 $\tau_i^L \in (-1, 1)$ 。

动态 SJC-Copula 函数具有不对称的尾部特征，对联合出力上尾、下尾的变化均敏感，即对风光出力较小时和较大时的相关特性均能进行有效刻画。

动态 N-Copula 函数的分布特性由相关系数 $\rho_{N,t}$ 刻画，动态 t-Copula 函数的分布特性由相关系数 $\rho_{t,t}$ 和自由度 k 刻画。N-Copula 和 t-Copula 的相关系数矩阵可依 DCC(1,1)分解为

$$\mathbf{R}_t = (\mathbf{Q}_t^*)^{-1/2} \{\mathbf{Q}_t\} (\mathbf{Q}_t^*)^{-1/2} \quad (16)$$

式中， $\mathbf{Q}_t^* = \text{diag}\{\mathbf{Q}_t\}$ 。 \mathbf{Q}_t 和的演化方程为

$$\mathbf{Q}_t = R(1 - \alpha - \beta) + \alpha(\varepsilon_{t-1}\varepsilon'_{t-1}) + \beta\mathbf{Q}_{t-1} \quad (17)$$

式中： α 、 β 为待估计的参数，且必须满足 $0 < \alpha < 1$ ， $0 < \beta < 1$ ， $0 < \alpha + \beta < 1$ ，同时 \mathbf{Q}_t 必须是正定的，以保证 $\mathbf{R}_t \in (-1, 1)$ ； ε_t 是分布函数的伪逆函数序列。

这两种 Copula 分布都具有对称的尾部特征，无法描述随机变量之间非对称的尾部相依关系。其中，二维动态 t-Copula 的尾部较厚，因此对对称的尾部关系可以进行较好的刻画。

2.3 拟合优度检验方法

本文采用赤池信息量准则(AIC)和贝叶斯信息量准则(BIC)来衡量模型的拟合优度^[27-28]，此外还引入对数极大似然估计值(LogL)对同结构 Copula 函数动态和静态模型的拟合优度加以比较。AIC 和 BIC 的定义式分别为^[27-28]

$$AIC = 2k - 2 \ln L \quad (18)$$

$$BIC = k \ln n - 2 \ln L \quad (19)$$

式中： k 为模型参数个数； L 为极大似然估计值； n 为样本数量。结合定义可知，AIC 和 BIC 是体现模型复杂度和拟合优劣的综合指标，其数值越小表示模型拟合优度越高，越简洁。此外，对于同结构 Copula 函数而言，LogL 越大则表明拟合优度越高。

2.4 建模流程

本文依据 MLK 方法生成边缘分布函数，求取似然函数，从而计算演进方程参数，建立上文所述 4 种动态 Copula 模型及其对应的静态 Copula 模型，计算相关系数及 AIC、BIC 指标。以动态 C-Copula 模型为例，计算流程如图 1 所示。

具体步骤如下。

步骤 1：读取出力数据，进行标么化处理，获得标么化序列 w_t 、 s_t 。

步骤 2：利用标么化序列 w_t 、 s_t ，计算核密度函数 $f_w(x_1)$ 、 $f_s(x_2)$ ；将序列代入演进方程，确定 α 、

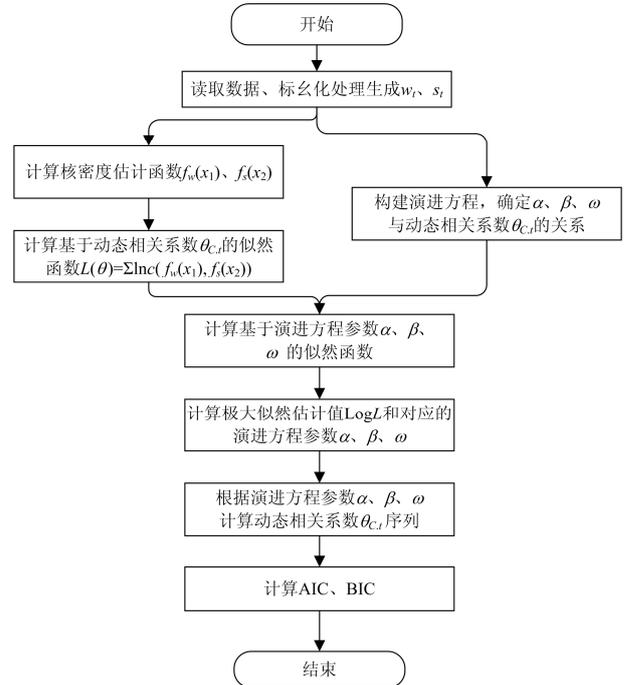


图 1 计算流程图

Fig. 1 Calculation flow chart

β 、 ω 与相关系数 $\theta_{C,t}$ 的关系。

步骤 3：将核密度函数 $f_w(x_1)$ 、 $f_s(x_2)$ 作为边缘分布函数代入似然函数，计算基于动态相关系数 $\theta_{C,t}$ 的似然函数 $\sum \ln c(f_w(x_1), f_s(x_2))$ 。

步骤 4：生成基于演进方程参数 α 、 β 、 ω 的似然函数，计算极大似然估计值 LogL 和对应的演进方程参数。

步骤 5：将计算出的 α 、 β 、 ω 代入演进方程，计算动态相关系数 $\theta_{C,t}$ 序列。

步骤 6：计算 AIC、BIC，结合 LogL 的大小，评价模型拟合优度，选出最优模型。

其他动态 Copula 函数的建模流程与此流程类似，仅在似然函数及演进方程结构上存在较大差别。对于静态 Copula 函数，则没有演进方程相关的环节，通过似然函数直接估计相关系数。

3 算例分析

3.1 数据来源及特性

本文以湖北随州一光伏电站和一风电场输出功率实测数据为例，进行风光出力的相关性分析和建模。数据选取 2016 年 6 月全月 30 天的同步测量数据，由于光伏电站在夜间无出力，故提取上午 7 点至傍晚 7 点的出力数据进行分析，每 5 min 取一个测量点，则每天取 144 点，30 天共计 4 320 组数据。光伏电站的额定出力为 100 MW，风电场的额定出

力为 148.5 MW。为便于观察和分析, 选取第 1 000 至 2 000 点做出力曲线和总出力曲线, 如图 2 所示。

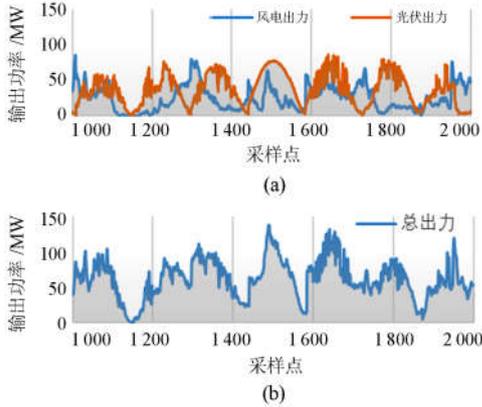


图 2 风电场和光伏电站出力曲线

Fig. 2 Wind and solar power output curve

结合图 2(a)中的风光出力曲线可以看出, 一些时刻风光出力呈现正相关特性, 一些时刻呈现负相关特性, 无法用某一种确定的相关性去描述。结合图 2(a)和图 2(b)可以看出, 呈现正相关特性时联合出力波动幅度大, 在总出力曲线上表现为尖峰和低谷, 呈负相关特性时波动幅度小, 在总出力曲线上表现为小幅度密集波动。这些峰谷和波动对电网可能造成较大的影响, 准确获取此类信息并进行定量的描述, 对调度人员维护电网的稳定运行具有重要参考意义, 也有助于风光电源的消纳。

3.2 核密度估计曲线

为获得风光出力的边缘分布函数, 首先统计出力数据并进行非参数核密度估计, 出力分布直方图及核密度估计分布函数如图 3、图 4 所示。

观察图 3 和图 4 可以发现, 风电出力和光伏出力分布不规则, 不适合用常见的分布函数去拟合。MLK 方法因其不需要估计边缘分布未知参数的特点, 避免了因边缘分布拟合优度不高而影响联合分布拟合优度的问题。

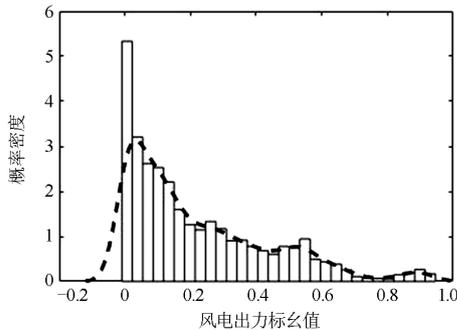


图 3 风电出力概率密度直方图及核密度估计曲线

Fig. 3 Wind power output probability density histogram and kernel density estimation curve

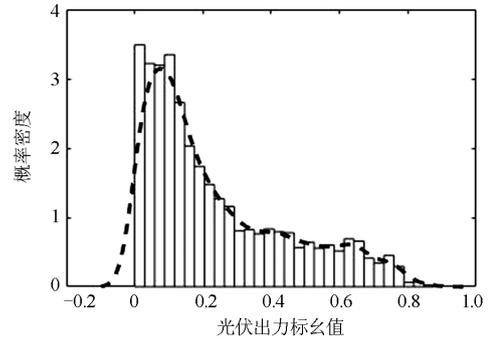
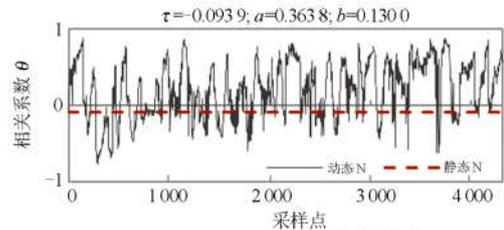


图 4 光伏出力概率密度直方图及核密度估计曲线

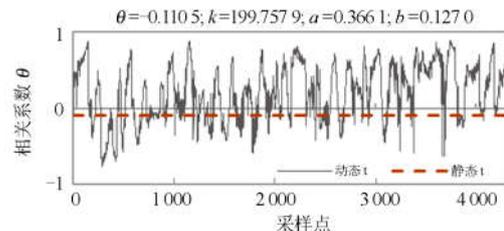
Fig. 4 Solar power output probability density histogram and kernel density estimation curve

3.3 模型拟合结果及评价

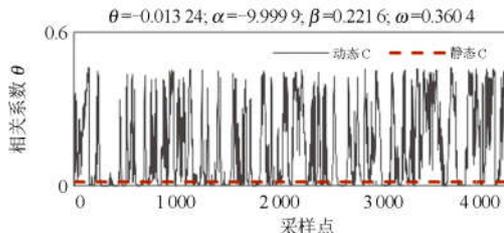
基于前文所述 Copula 理论及建模流程构建 4 种动态 Copula 模型及其对应的 4 种静态 Copula 模型, 分析计算结果并对比 8 种模型的拟合优度。计算结果如图 5 所示。



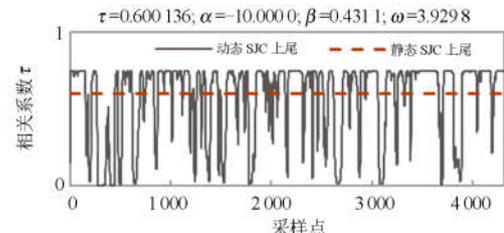
(a) N-Copula 相关系数曲线



(b) t-Copula 相关系数曲线



(c) C-Copula 相关系数曲线



(d) SJC-Copula 上尾相关系数曲线

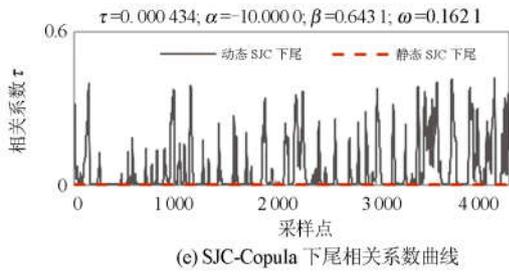


图 5 相关系数曲线

Fig. 5 Correlation coefficient curve

从图 5 可以看出，各函数相关系数的波动性很大，甚至出现正负相关性质发生变化的情况，静态的相关系数无法确切描述风光联合出力的相关性。结合图 5(a)和图 5(b)分析，t-Copula 分布的自由度估计值为 199.7579，数值非常大，在此自由度下 t-Copula 近似于正态分布，因此相关系数的估计值几乎相同。

模型采用 AIC 和 BIC 对拟合优度进行检验，并通过比较 $\text{Log}L$ 数值来加以比较同结构 Copula 函数静态和动态模型的拟合优劣，计算结果如表 1 所示。

表 1 不同模型拟合优劣对比

Table 1 Comparison of fitting effects

Copula 函数	AIC	BIC	$\text{Log}L$
动态 Clayton	-2 754.837 5	-2 735.724 5	1 380.419
静态 Clayton	582.630 2	589.001 2	-290.315
动态 SJC	-3 509.609 2	-3 471.383 1	1 760.805
静态 SJC	-1 872.785 2	-1 860.043 2	938.393
动态 t	-3 022.367 8	-3 003.254 8	1 514.184
静态 t	582.630 2	589.001 2	-290.315
动态 N	-3 055.919 5	-3 043.177 4	1 529.960
静态 N	543.250 4	548.602 8	-270.422

对同结构 Copula 函数动态和静态模型的拟合优度进行比较发现，动态模型 AIC、BIC 值远小于静态模型的对应值，而动态函数对数极大似然估计值远大于静态值，因此动态模型的拟合优度明显高于静态模型，此数据说明动态 Copula 模型能更好地描述风光联合出力的相关性及其相关性的变化特性。

在上述动态 Copula 模型中，基于动态 SJC-Copula 函数建立的模型 AIC 和 BIC 最小，故拟合优度最高。

3.4 合理性验证

将动态 SJC-Copula 模型应用到出力数据序列驱动的风光联合系统中验证其合理性。SJC-Copula 具有上尾和下尾两个相关系数，可以对具有非对称的尾部特征的二维变量相依结构进行刻画。上尾相关系数表征两变量取值同时接近于 1 时的概率，下

尾相关系数表征两变量取值同时接近于 0 时的概率。因此，尾部相关系数与总出力应当存在对应关系，将 SJC-Copula 模型动态上尾相关系数、动态下尾相关系数与风光总出力曲线置于一张图中进行比较，为了方便观察细节，取第 1 000 至第 2 000 个采样点数据，如图 6 所示。

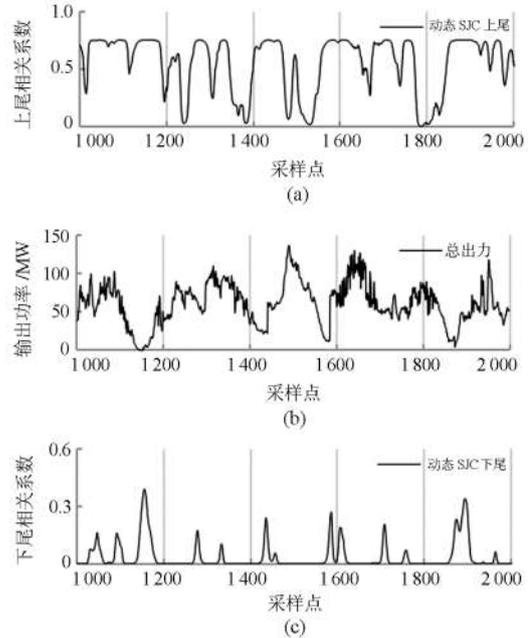


图 6 SJC-Copula 相关系数曲线与总出力曲线对比

Fig. 6 Comparison of SJC-Copula correlation coefficient curve and total power output curve

从图 6(b)和图 6(c)可知，当下尾相关系数突增时，表明风光出力相关性在一个很低的水平上显著增大，在总出力曲线上表现为低谷；从图 6(a)和图 6(b)可知，当上尾相关系数突增时，表明风光出力相关性在一个很高的水平上显著增大，在总出力曲线上表现为尖峰。综合观察可知，当二者都较平缓时，表明此时风光出力相关特性变化不显著，总出力曲线按照一个趋势发展并在小范围内抖动。可见，动态 Copula 模型可以良好地展现风光联合出力的相关性和波动性，模型合理有效。

4 结论

本文引入湖北随州地区一风电场和一光伏电场 2016 年 6 月全月的实测数据，基于动态 Copula 理论提出了风光联合出力动态 Copula 模型构建方法，建立了 8 种动态、静态 Copula 模型并进行了拟合优度检验和计算结果分析，得到主要结论如下：

1) 同一地区风光出力存在相关性，且相关性是动态的，随着时间推移会发生本质上的改变，动态

相关系数更能体现这一特性。

2) 根据拟合优度检验结果, 动态 Copula 模型拟合优度明显高于静态 Copula 模型。其中, 动态 SJC-Copula 最适用于此系列数据的建模, 能够对风光联合出力特性的不对称尾部特征进行良好的刻画。

3) 动态 SJC-Copula 模型的上、下尾相关系数波动性与总出力之间存在对应关系, 依据此关系证明了模型的合理性及有效性。

参考文献

- [1] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8.
- [2] 郭永明, 李仲昌, 尤小虎, 等. 计及备用容量优化配置的风火联合随机经济调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 31-36.
GUO Yongming, LI Zhongchang, YOU Xiaohu, et al. Stochastic economic dispatch model for joint delivery of wind power and thermal power generation system considering optimal scheduling of reserve capacity[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 31-36.
- [3] 刘阳, 杨正瓴, 张泽, 等. 采用变系数模型改进空间相关性风速预测[J]. 广东电力, 2017, 30(6): 50-54.
LIU Yang, YANG Zhengling, ZHANG Ze, et al. Improvement of spatial correlation wind speed prediction based on variable coefficient model[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(6): 50-54.
- [4] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.
ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.
- [5] 初壮, 窦孝祥, 于群英. 考虑风电随机性的多场景配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 132-138.
CHU Zhuang, DOU Xiaoxiang, YU Qunying. Multi scene distribution network reconfiguration considering the randomness of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 132-138.
- [6] 董联, 殷豪, 孟安波. 基于混合算法优化神经网络的风电预测模型[J]. 广东电力, 2017, 30(2): 29-33.
DONG Zhen, YIN Hao, MENG Anbo. Wind power forecasting model based on optimized neural network of hybrid algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(2): 29-33.
- [7] 叶燕飞, 王琦, 陈宁, 等. 考虑时空分布特性的风速预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 114-120.
YE Yanfei, WANG Qi, CHEN Ning, et al. Wind forecast model considering the characteristics of temporal and spatial distribution[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 114-120.
- [8] 唐波, 葛光祖, 张建功, 等. 特高压直流线路对调幅广播台无源干扰防护间距的求解[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2013, 26(4): 577-580.
TANG Bo, GE Guangzu, ZHANG Jianguo, et al. Protecting distance of reradiation interference between UHVDC power line and receiving station of am broadcasting[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2013, 26(4): 577-580.
- [9] 许童羽, 马艺铭, 曹英丽, 等. 基于主成分分析和遗传优化 BP 神经网络的光伏输出功率短期预测[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 90-95.
XU Tongyu, MA Yiming, CAO Yingli, et al. Short term forecasting of photovoltaic output power based on principal component analysis and genetic optimization of BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 90-95.
- [10] 舒印彪, 汤涌, 孙华东. 电力系统安全稳定标准研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 1-9.
SHU Yinbiao, TANG Yong, SUN Huadong. Research on power system security and stability standards[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 1-9.
- [11] PAPAETHYMIU G, KUROWICKA D. Using Copulas for modeling stochastic dependence in power system uncertainty analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 40-49.
- [12] 黄静, 刘江峰, 赵志强, 等. 组串式并网逆变器运行性能研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2018, 31(4): 650-656.
HUANG Jing, LIU Jiangfeng, ZHAO Zhiqiang, et al. Operational performance analysis of grid-connected PV string-type inverter[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2018, 31(4): 650-656.
- [13] 徐玉琴, 张林浩. 考虑风速相关性的风电接入能力分析[J]. 可再生能源, 2014, 32(2): 201-206.
XU Yuqin, ZHANG Linhao. Analysis on wind power penetration limit considering wind speed correlation[J].

- Renewable Energy, 2014, 32(2): 201-206.
- [14] HAGHI H V. Using Copulas for analysis of large datasets in renewable distributed generation: PV and wind power integration in Iran[J]. Renewable Energy, 2010, 35(9): 1991-2000.
- [15] 杨洪明, 王爽, 易德鑫, 等. 考虑多风电场出力相关性的电力系统随机优化调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 114-120.
YANG Hongming, WANG Shuang, YI Dexin, et al. Stochastic optimal dispatch of power system considering multi-wind power correlation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 114-120.
- [16] 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.
CAI Fei, YAN Zheng, ZHAO Jingbo, et al. Dependence structure models for wind speed and wind power among different wind farms based on Copula theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 9-16.
- [17] 王小红, 周步祥, 张乐, 等. 基于时变Copula函数的风电出力相关性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(1): 43-48.
WANG Xiaohong, ZHOU Buxiang, ZHANG Le, et al. Wind power correlation analysis based on time-variant Copula function[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(1): 43-48.
- [18] 赵继超, 袁越, 傅质馨, 等. 基于Copula理论的风光互补发电系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 124-129.
ZHAO Jichao, YUAN Yue, FU Zhixin, et al. Reliability assessment of wind-PV hybrid generation system based on Copula theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 124-129.
- [19] 张盼盼, 熊炜. 基于 Copula 方法的风光互补发电系统相关性模型研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(17): 93-98.
ZHANG Panpan, XIONG Wei. Correlation model research on Copula function based wind/solar complementary generation system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(17): 93-98.
- [20] 钟嘉庆. 基于 Copula 理论的风/光出力预测误差分析方法的研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(6): 39-46.
ZHONG Jiaqing. Method of wind/solar output forecast error analysis based on Copula theory[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(6): 39-46.
- [21] NELSEN R B. An introduction to Copulas[M]. Springer, 2006.
- [22] XU Haidong, JIANG Mingyan, XU Kun. Archimedean copula estimation of distribution algorithm based on artificial bee colony algorithm[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 26(2): 388-396.
- [23] PATTON A J. Modelling asymmetric exchange rate dependence[J]. International Economic Review, 2006, 47(2): 527-556.
- [24] PATTON A J. Estimation of multivariate models for time series of possibly different lengths[J]. Journal of Applied Econometrics, 2006, 21(2): 147-173.
- [25] ENGLE R. Dynamic conditional correlation[J]. Journal of Business & Economic Statistics, 2002, 20(3): 339-350.
- [26] 任仙玲. 基于 Copula 理论的金融市场相依结构研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
REN Xianling. Research on dependence structure among financial markets based on the Copula theory[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [27] AKAIKE H. Factor analysis and AIC[J]. Psychometrika, 1987, 52(3): 317-332.
- [28] MILLER F P, VANDOME A F, MCBREWSTER J. Bayesian information criterion[M]. Alphascript Publishing, 2010.

收稿日期: 2018-02-02; 修回日期: 2018-05-07

作者简介:

段德默(1994—), 男, 硕士, 研究方向为含新能源的电力系统优化运行;

苗世洪(1963—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护与运行控制、微电网与配电网新技术等. E-mail: shmiao@hust.edu.cn

(编辑 魏小丽)