

DOI: 10.7500/AEPS201211262

考虑风速相关性的发输电系统可靠性评估

秦志龙¹, 李文沅^{1,2}, 熊小伏¹

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆大学, 重庆市 400044;

2. BC Hydro 公司, 温哥华 V7X 1V5, 加拿大)

摘要: 基于 Copula 函数理论, 提出了一种产生多维相关风速的模型并把该模型应用于含多个风电场的发输电系统可靠性评估的蒙特卡洛模拟方法中。通过历史风速数据对模型的验证表明: 与常规的矩阵变换法相比, 文中所提出的 Copula 函数模型能够更好地保持历史风速序列的概率分布、基本统计量和相关特性。将所述模型和方法应用到含风电场的 IEEE-RTS 发输电可靠性测试系统中, 证明了与所提出的 Copula 函数法相比, 常规的矩阵变换法会造成对系统可靠性指标的低估。

关键词: 风速模型; 风速相关性; Copula 函数; 蒙特卡洛仿真

0 引言

风能作为一种清洁的可再生能源, 越来越受到世界各国的重视。随着风能的大规模利用, 同一地区将会存在多个风电场接入电力系统。在同一地区内, 风电场的风速存在一定相关性, 因此在对多个风电场接入电力系统进行可靠性评估时, 应该考虑它们之间的风速相关性。近年来, 各国学者对含风电场的电力系统可靠性评估方法进行了研究^[1-8]。文献[1-4]基于蒙特卡洛仿真方法, 考虑了风速的随机变化, 建立了含风电场的电力系统可靠性评估模型, 但是它们都没考虑风电场之间的风速相关性。文献[5-6]基于风速的时序模型, 用不同方法模拟产生了具有一定相关性的时序风速样本, 但是未计及风速在每一时间点的概率不确定性。文献[7-8]通过矩阵变换法, 对协方差矩阵进行变换得到了相关性风速样本, 但是该方法理论上只适于正态分布, 而风速并不服从正态分布, 因而会产生较大误差。而且文献[7-8]只是建立了含风速相关性的发电系统可靠性分析模型, 并没有应用到发输电系统可靠性评估上。此外, 文献[5-8]提出的产生相关性风速的方法, 理论上只能模拟风速之间的线性相关性, 不能模拟风速之间的非线性相关性。

本文提出模拟风速相关性的 Copula 函数模型, 并应用于含风电场的发输电系统可靠性评估。与常

规的矩阵变换法^[7-8]相比, 本文提出的 Copula 函数模型能够更好地保持历史风速数据的概率分布特性、基本统计量, 以及线性和非线性相关结构。与本文所提出的 Copula 函数法相比, 常规的矩阵变换法低估了风速的相关性对系统可靠性的影响。本文还针对风速的相关性水平、风电场安装地点和风电渗透水平 3 个因素, 对包含风电场的 IEEE-RTS^[9] 发输电可靠性测试系统的影响进行了分析。

1 矩阵变换法介绍

矩阵变换法是目前使用的模拟不同风电场风速相关性的常规方法。

N 维均值为 $\mathbf{U}$ 、协方差矩阵为 $\mathbf{\Omega}$ 的正态分布向量 $\mathbf{X}$ 满足以下关系式:

$$\mathbf{X} = \mathbf{L}\mathbf{Z} + \mathbf{U} \quad (1)$$

$$\mathbf{\Omega} = \mathbf{L}\mathbf{L}^T \quad (2)$$

式中: $\mathbf{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_N)$, 为具有零均值和单位方差的标准正态分布向量; $\mathbf{L}$ 为下三角矩阵。

上述关系理论上只适于正态分布。常规的方法是将这些关系直接用于非正态分布的多个风电场相关风速模拟^[7-8], 按照式(1)进行计算得到一组具有线性关联特性的风速向量, 用线性相关系数来表示这一线性关联特性, 对 2 个风电场风速 v_1 和 v_2 来说, 其相关系数 ρ 可表示为:

$$\rho = \frac{E(v_1 v_2) - E(v_1)E(v_2)}{\sqrt{\text{var}(v_1)}\sqrt{\text{var}(v_2)}} \quad (3)$$

式中: $E(\cdot)$ 为取数学期望函数; $\text{var}(\cdot)$ 为取方差函数, 其值均大于 0。

可见, 式(3)仅仅反映了风速之间的线性相关性, 而不能反映风速间的非线性相关性。同时, 风电

收稿日期: 2012-11-28; 修回日期: 2013-04-09。

重庆大学研究生科技创新基金资助项目(CDJXS11150025);
输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室科学研究基金资助项目(2007DA10512710201, 2007DA10512711102)。

场的风速并不满足正态分布,因为式(1)和式(2)要求的正态分布假定没有被满足,所以应用矩阵变换法去产生相关性风速可能造成较大误差。下文介绍的 Copula 函数法可以很好地克服以上缺点,更好地表达了风速之间的相关性。

2 基于 Copula 函数的风速相关性模型

2.1 Copula 函数介绍

Sklar 定理是 Copula 函数的基础,由 Sklar 定理可知:利用 Copula 函数,可以达到将边缘分布和随机变量间的相关结构分离开来的目的^[10]。

常用的 Copula 函数主要有多元正态 Copula 函数、多元 t -Copula 函数和阿基米德 Copula 函数。

N 元随机向量 $(u_1, u_2, \dots, u_N)$ 正态 Copula 函数为:

$$C(u_1, u_2, \dots, u_N; \mathbf{e}) = \Phi_{\mathbf{e}}(\Phi^{-1}(u_1), \Phi^{-1}(u_2), \dots, \Phi^{-1}(u_N)) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{e}$ 为相关性参数矩阵; $\Phi_{\mathbf{e}}(\cdot)$ 为以 $\mathbf{e}$ 为相关性参数矩阵的标准多元正态分布函数; $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态分布函数的逆函数。

对于二元正态 Copula 函数,有

$$C(u_1, u_2; \alpha) = \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u_1)} \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u_2)} \frac{\exp\left(\frac{-(r^2 + s^2 - 2\alpha rs)}{2(1-\alpha^2)}\right)}{2\pi\sqrt{1-\alpha^2}} dr ds \quad (5)$$

式中: α 为相关性参数。

N 元 t -Copula 函数可表示为:

$$C(u_1, u_2, \dots, u_N; \mathbf{e}, h) = t_{\mathbf{e}, h}(t_h^{-1}(u_1), t_h^{-1}(u_2), \dots, t_h^{-1}(u_N)) \quad (6)$$

式中: $t_{\mathbf{e}, h}(\cdot)$ 为以 $\mathbf{e}$ 为相关性参数矩阵、自由度为 h 的标准 N 元 t 分布函数; $t_h^{-1}(\cdot)$ 为自由度为 h 的一元 t 分布函数的逆函数。

对于二元 t -Copula 函数,有

$$C(u_1, u_2; \alpha, h) = \int_{t_h^{-1}(u_1)}^{t_h^{-1}(u_2)} \int_{-\infty}^{t_h^{-1}(u_1)} \frac{\left[1 + \frac{r^2 + s^2 - 2\alpha rs}{h(1-\alpha^2)}\right]^{-\frac{h+2}{2}}}{2\pi\sqrt{1-\alpha^2}} dr ds \quad (7)$$

N 元阿基米德 Copula 函数为:

$$C(u_1, u_2, \dots, u_N; \alpha) = \varphi^{-1}(\varphi(u_1) + \varphi(u_2) + \dots + \varphi(u_N)) \quad (8)$$

式中: $\varphi(\cdot)$ 为阿基米德函数的生成元, $\varphi^{-1}(\cdot)$ 为其逆函数。

常用的阿基米德 Copula 函数有 Gumbel Copula, Clayton Copula 和 Frank Copula 函数。

N 元 Gumbel Copula 函数的表达式为:

$$C(u_1, u_2, \dots, u_N; \alpha) = \exp\left(-\left[\sum_{i=1}^N (-\ln u_i)^{\frac{1}{\alpha}}\right]^{\alpha}\right) \quad \alpha \in (0, 1] \quad (9)$$

N 元 Clayton Copula 函数的表达式为:

$$C(u_1, u_2, \dots, u_N; \alpha) = \left(\sum_{i=1}^N u_i^{-\alpha} - N + 1\right)^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (10)$$

式中: $\alpha \in (0, \infty)$ 。

N 元 Frank Copula 函数的表达式为:

$$C(u_1, u_2, \dots, u_N; \alpha) = -\frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left[1 + \frac{\prod_{i=1}^N (\exp(-\alpha u_i) - 1)}{(\exp(-\alpha) - 1)^{N-1}} \right] \quad (11)$$

式中: $\alpha \neq 0, N \geq 3$ 时, $\alpha \in (0, \infty)$ 。

与式(3)表达的线性相关系数相比,秩相关系数具有单调增变换不变性、稳健性和对相关关系的描述程度更广等优点^[10]。二元 Copula 函数 $C(u_1, u_2) \in [0, 1]$ 与秩相关系数 τ 有如下一般关系^[10]:

$$\tau = 4 \int_0^1 \int_0^1 C(u_1, u_2) dC(u_1, u_2) - 1 \quad (12)$$

对于常用二元 Copula 函数,由式(12)可以得到秩相关系数 τ 与 Copula 函数的相关性参数之间的关系如表 1 所示^[10]。表中: $D_m(x) = (m/x^m) \int_0^x [y^m / (\exp(y) - 1)] dy$, 为 Debye 函数。

表 1 Copula 函数参数与秩相关系数之间的关系
Table 1 Relationship between Copula parameter and rank correlation coefficient

Copula 函数	秩相关系数
正态 Copula	$(2\arcsin \alpha)/\pi$
t -Copula	$(2\arcsin \alpha)/\pi$
Gumbel Copula	$1 - \alpha$
Clayton Copula	$\alpha/(\alpha + 2)$
Frank Copula	$1 + 4(D_1(\alpha) - 1)/\alpha$

多元正态 Copula 函数、 t -Copula 函数、Frank Copula 函数分布具有对称性,可以用来描述变量间对称的相关模式。而 Gumbel Copula 和 Clayton Copula 函数分布具有非对称性,可以用来描述变量间非对称的相关模式;不同的是 Gumbel Copula 函数分布更强调上尾相关性,而 Clayton Copula 函数分布则更强调变量间的下尾相关性^[10]。

由于各种 Copula 函数的以上不同特点,使得在使用它们来模拟多风速变量时,可以适用于不同风速相关性情况。实际上,有的风速分布是对称的,有的又是不对称的;有的风速是中部相关性强,而有的则是上尾部或下尾部相关性强。这些差异均能被不同

Copula 函数分布所捕获。显然,矩阵变换法不能区分这些复杂情况。所以说用 Copula 函数来模拟风电场的相关风速是合适的。

2.2 基于 Copula 函数产生相关风速的方法

2.2.1 Copula 函数模型中的分步参数估计

边缘分布函数中含有未知参数,并且选取的 Copula 函数中也含有未知参数,因此需要进行参数估计。本文通过分步参数估计来进行参数估计。

1)首先要确定风速的边缘分布,确定风速边缘分布就是假定风速随机变量服从某种含有参数的分布,常见的风速分布模型有 Weibull 分布和 Gamma 分布等^[11]。用本文提出的 Copula 函数方法,可以采用任意风速边缘分布。因为 Weibull 分布是公认的用得最多的风速分布,下面以 Weibull 分布为例。

可以用最大似然估计法来估计风速 Weibull 分布中的尺度参数 λ 和形状参数 k ^[11]。

风速 v 的 Weibull 概率密度函数为:

$$f(v; \lambda, k) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{v}{\lambda} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{v}{\lambda} \right)^k \right) \quad (13)$$

风速 v 的 Weibull 累积分布函数为:

$$F(v; \lambda, k) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{v}{\lambda} \right)^k \right) \quad (14)$$

2)在得出边缘分布的参数后,将其代入式(15)或式(16),用拟牛顿法求解式(15)或式(16)得到相关性参数矩阵 e 或相关性参数 α 的估计值。

$$\hat{e} = \arg \max \sum_{l=1}^n \ln c(u_1, u_2, \dots, u_N; e) \quad (15)$$

$$\hat{\alpha} = \arg \max \sum_{l=1}^n \ln c(u_1, u_2, \dots, u_N; \alpha) \quad (16)$$

式中: $u_i = F_i(v_{i,l}; \lambda_i, k_i)$, 为第 i 个风电场第 l 个风速样本 $v_{i,l}$ 的边缘分布函数; $c(\cdot)$ 为 Copula 密度函数。

2.2.2 Copula 函数的选择

如前面所述,不同的 Copula 函数表达不同的相关特性。不同的风速相关性有不同的特点,有的是中间部位强相关,有的是尾部强相关。因此,不同的风速相关性需要选用最适当的 Copula 函数。本文采用基于经验 Copula 函数和理论 Copula 函数的最短距离法来选取最适当的 Copula 函数^[12]。经验 Copula 函数可采用下式表示^[12]:

$$C_e \left(\frac{b_1}{n}, \frac{b_2}{n}, \dots, \frac{b_N}{n} \right) = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n I(r_{1l} \leq b_1, r_{2l} \leq b_2, \dots, r_{Nl} \leq b_N) \quad (17)$$

式中: $I(\cdot)$ 为示性函数,若括号内条件满足,则其值为 1,反之则为 0; $r_{1l}, r_{2l}, \dots, r_{Nl}$ 为容量为 n 的风速样本的秩统计量; $1 \leq b_1 \leq b_2 \leq \dots \leq b_N \leq n$ 。

经验 Copula 函数与理论 Copula 函数之间的欧式距离可通过下式计算:

$$d(C, C_e) = \left[\sum_{b_1=1}^n \sum_{b_2=1}^n \dots \sum_{b_N=1}^n \left(C \left(\frac{b_1}{n}, \frac{b_2}{n}, \dots, \frac{b_N}{n} \right) - C_e \left(\frac{b_1}{n}, \frac{b_2}{n}, \dots, \frac{b_N}{n} \right) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

根据上述计算结果,选择距离最小的理论 Copula 函数作为描述风速变量相关结构的最优函数。

2.2.3 多维风电场相关风速的产生

当描述风速相关结构的最优 Copula 函数确定后,本文用一种条件抽样法^[10]产生具有相关性的多维风速样本,步骤如下。

1)生成包含 N 个独立服从 $(0,1)$ 均匀分布的随机数的向量 $(Y_1, Y_2, \dots, Y_N)$ 。

2)按如下递归算法,产生服从 N 维 Copula 函数的随机数向量 $(u_1, u_2, \dots, u_N)$ 。

$$u_i = C_{(u_1, u_2, \dots, u_{i-1})}^{-1}(Y_i) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (19)$$

$$C_{(u_1, u_2, \dots, u_{i-1})}(u_i) = \Pr\{U_i \leq u_i | U_1 = u_1, U_2 = u_2, \dots, U_{i-1} = u_{i-1}\} = \frac{\partial_{(u_1, u_2, \dots, u_{i-1})}^{-1} C(u_1, u_2, \dots, u_i, 1, 1, \dots, 1)}{\partial_{(u_1, u_2, \dots, u_{i-1})}^{-1} C(u_1, u_2, \dots, u_{i-1}, 1, 1, \dots, 1)} \quad (20)$$

$$\partial_{(u_1, u_2, \dots, u_{i-1})}^{-1} C = \frac{\partial^{i-1} C}{\partial u_1 \partial u_2 \dots \partial u_{i-1}} \quad (21)$$

3)通过风速边缘分布的逆变换求得风速。

$$v_i = F_i^{-1}(u_i) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (22)$$

3 含风电场的发电系统可靠性评估步骤

含风电场的发电系统可靠性评估的步骤如下。

步骤 1:使用一种聚类技术建立多级水平负荷模型,得到每个负荷水平的大小和概率^[13-14]。针对每一级水平负荷,进行步骤 2 至步骤 6 的计算。

步骤 2:用第 2.2 节中描述的 Copula 函数方法产生多维风速样本。①通过分步参数估计法,估计各个风电场风速的边缘分布函数的参数和 Copula 函数中的参数;②用最短距离法选取最优 Copula 函数;③根据最优 Copula 函数,用条件抽样法产生具有相关性的多维风速样本。

步骤 3:通过风速和风电机组输出功率的函数关系^[6],计算出各个风电场的风电输出功率。

步骤 4:使用蒙特卡洛抽样随机选择系统元件(发电机、输电线、变压器)的状态,其中发电机包括传统发电机和风力发电机。步骤 4 包括:①对每个元件产生一个 $(0,1)$ 均匀分布的随机数 R_j ;②确定第 j 个元件的状态 s_j 。

$$s_j = \begin{cases} 0 & R_j > Q_j \\ 1 & 0 \leq R_j \leq Q_j \end{cases} \quad (23)$$

式中:0 为工作状态;1 为失效状态; Q_j 为第 j 个元件的不可用度概率。

步骤 5:基于下面的最优化模型计算最小负荷削减量^[13-14]。

$$\min \sum_{i \in \Psi} M_i \quad (24)$$

约束条件为:

$$\mathbf{T}(S) = \mathbf{A}(S)(\mathbf{G} - \mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (25)$$

$$\sum_{i \in \Delta} G_i + \sum_{i \in \Psi} M_i = \sum_{i \in \Psi} H_i \quad (26)$$

$$G_i^{\min} \leq G_i \leq G_i^{\max} \quad i \in \Delta \quad (27)$$

$$0 \leq M_i \leq H_i \quad i \in \Psi \quad (28)$$

$$|T_i(S)| \leq T_i^{\max} \quad i \in \Theta \quad (29)$$

式中: $\mathbf{T}(S)$ 为系统停运状态 S 的有功潮流向量; $\mathbf{G}$ 和 $\mathbf{H}$ 分别为发电机输出功率和负荷功率向量; $\mathbf{A}(S)$ 为停运状态 S 的有功潮流和注入功率间的关系矩阵; $\mathbf{M}$ 为负荷削减向量; $G_i, H_i, M_i, T_i(S)$ 分别为 $\mathbf{G}, \mathbf{H}, \mathbf{M}, \mathbf{T}(S)$ 的元素; $G_i^{\min}, G_i^{\max}$ 和 $T_i^{\max}$ 分别为 G_i 和 $T_i(S)$ 的限值; Δ, Ψ, Θ 分别为系统发电母线、负荷母线和支路的集合。

模型的目标是求取满足功率平衡、直流潮流方程以及线路潮流和发电出力约束下的最小负荷削减总量。

步骤 6:重复骤 2 至步骤 5,直到满足蒙特卡洛抽样的终止判据,即直到期望缺电量(EENS)指标的方差系数小于一个给定的阈值(如 0.05)。

步骤 7:计算考虑多级负荷模型的总 EENS 指标,它是每级负荷水平下的 EENS 和该级水平的概率乘积之和。

4 算例研究

本节中使用的风速数据为山东烟台潍坊地区两潜在风电场(记为 A 和 B)10 年风速历史时序记录^[15]。

4.1 选取最优 Copula 函数

采用分步参数估计法计算出风速边缘分布的参数 k 和 λ ,得到 Copula 函数的参数,如表 2 所示。

表 2 Copula 函数参数的计算结果
Table 2 Results of Copula function parameter

Copula 函数	α	Copula 函数	α
正态 Copula	0.561 4	Clayton Copula	0.862 3
t -Copula	0.569 3	Frank Copula	3.893 6
Gumbel Copula	1.528 1		

2 个风电场风速的经验 Copula 函数和理论 Copula 函数在样本点处的欧式距离如表 3 所示。

可以看出,对于这 2 个风电场风速来说,正态 Copula 函数具有最短距离,因此选择该函数描述 2 个风电场风速的相关结构。

表 3 2 个风电场风速的经验 Copula 函数和理论 Copula 函数间的欧式距离

Table 3 Euclidean distance between empirical Copula and theoretical Copula function of wind speeds at two wind farms

Copula 函数	欧式距离	Copula 函数	欧式距离
正态 Copula	0.124 2	Clayton Copula	1.879 2
t -Copula	0.143 4	Frank Copula	25.372 5
Gumbel Copula	5.712 5		

4.2 Copula 函数法与矩阵变换法的对比验证

通过历史风速数据、矩阵变换法和 Copula 函数法,分别计算出 2 个风电场风速的均值 V 、线性相关系数 ρ 、秩相关系数 τ 以及风速 Weibull 边缘分布函数的参数 k 和 λ ,如表 4 所示。

表 4 2 个风电场历史和模拟风速基本统计量间的对比
Table 4 Comparison between basic statistics of historical and simulated wind speeds at two wind farms

方法	风电场 A			风电场 B			ρ	τ
	λ	k	V	λ	k	V		
历史数据	5.57	2.17	4.94	6.48	1.76	5.76	0.56	0.38
矩阵变换法	5.65	2.25	5.00	6.63	1.83	5.91	0.53	0.35
Copula 函数法	5.57	2.17	4.94	6.48	1.76	5.76	0.56	0.38

由表 4 可以看出,用 Copula 函数法产生的风速基本统计量与根据历史数据算出的风速基本统计量是相同的,但是用矩阵变换法产生的基本统计量与根据历史数据算出的基本统计量有一定的偏差。

散点图是描述 2 个风速变量相关结构的比较直观的工具。2 个风电场的历史风速散点图如附录 A 图 A1 所示;分别用矩阵变换法和 Copula 函数法模拟 2 个风电场风速的散点图如附录 A 图 A2 和图 A3 所示。由散点图可知,用 Copula 函数法得到的 2 个风电场的风速相关结构与 2 个风电场的历史风速数据的相关结构相似;而用常规的矩阵变换法得到的 2 个风电场的风速相关结构与 2 个风电场的历史风速数据的相关结构相比具有一定的偏差。出现偏差的原因主要是因为用理论上只适于正态分布的矩阵变换法模拟 2 个风电场的非正态分布风速相关性时产生了误差,同时还产生了一定数量的负值^[7],为了符合风电场风速的实际情况,需要去除这些负值风速。

综上所述,与常规的矩阵变换法相比,用 Copula 函数法产生大量风速数据时,可以更好地保持历史风速数据表征的概率分布特性、基本统计量,

以及线性和非线性相关结构。

4.3 含风电场的发输电系统可靠性评估

采用 IEEE-RTS 发输电可靠性测试系统验证本文模型在含风电相关性的发输电系统可靠性评估中的应用。IEEE-RTS 系统有 32 台发电机,总装机容量为 3 405 MW,系统峰荷为 2 850 MW^[9]。2 个容量为 300 MW 的风电场分别经节点 1 和 3 接入 IEEE-RTS 系统,每个风力发电机的强迫停运率为 0.05,切入、额定、切出速度分别为 4.0, 11.1, 20.0 m/s。风力发电机的输出功率可以由其输出功率和风速^[7]的函数关系确定。以风电场 B 为例,其聚类风电功率输出的概率分布对比如图 1 所示。

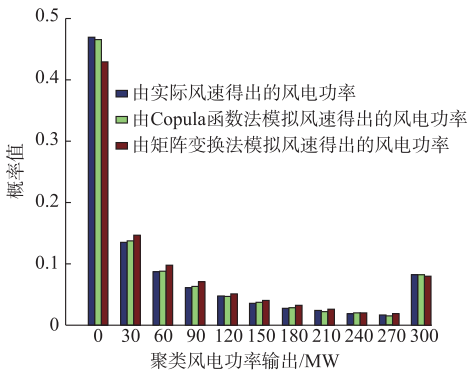


图 1 风电场 B 的聚类风电功率输出的概率分布
Fig.1 Probability distributions of the aggregated wind power output of wind farm B

由图 1 看出,与矩阵变换法相比,Copula 函数法模拟风速得出的聚类风电功率输出更接近由历史数据得出的聚类风电功率输出。

2 个风电场接入 IEEE-RTS 系统前后的可靠性指标如表 5 所示。表中:PLC 表示负荷削减概率;情况 1 为不考虑风速相关性;情况 2 为考虑风速相关性的 Copula 函数法;情况 3 为考虑风速相关性的矩阵变换法。可以看出,接入风电场后系统可靠性水平明显提高;与计及风速相关性比较,不计风速相关性会造成对发输电系统可靠性的过于乐观的估计。与所提出的 Copula 函数法相比,矩阵变换法低估了风速相关性对系统可靠性产生的消极影响。

表 5 2 个风电场接入 IEEE-RTS 系统前后的可靠性指标
Table 5 Reliability indices for IEEE-RTS system before and after adding the two wind farms

接入前后	PLC	EENS/(MW·h)·a ⁻¹)
接入前	0.001 50	1 593.7
情况 1	0.000 87	907.5
接入后 情况 2	0.000 93	972.4
情况 3	0.000 91	950.7

对风速相关性水平、风电场位置和风电渗透水

平等因素对该系统可靠性的影响进行了分析。风速相关性水平用 3 个不同的秩相关系数 τ 来作灵敏度分析。通过表 1 中秩相关系数 τ 与 Copula 函数参数之间的关系,计算出正态 Copula 函数参数,然后用条件抽样法产生相关的风速样本^[10]。反映不同风电场位置的 3 个算例如下:①算例 1,2 个风电场分别接入节点 1 和节点 3;②算例 2,2 个风电场分别接入节点 15 和节点 20;③算例 3,2 个风电场分别接入节点 18 和节点 23。

当 100,200,300 MW 风电场(各 2 个)分别接入到 IEEE-RTS 系统时,风电渗透水平大约分别为总发电容量的 5%,10%,15%。

2 个风电场的风速相关性水平、风电场容量和风电场位置对系统可靠性的影响见表 6。表中, $\tau(0,0.5)$ 以百分数的形式来表示同一算例中,秩相关系数分别为 0 和 0.5 的 EENS 之间的相对差异; $\tau(0,1)$ 有相似的意义。

表 6 在不同情况下的 EENS
Table 6 EENS in different cases

风电场容量/MW	算例	$\tau=0$	$\tau=0.5$	$\tau=1.0$	$\tau(0,0.5)/\tau(0,1)/\%$	$\tau(0,1)/\%$
100×2	算例 1	1 214.3	1 269.5	1 301.3	4.55	7.16
	算例 2	1 291.8	1 335.2	1 358.7	3.36	5.18
	算例 3	1 386.2	1 421.8	1 440.5	2.57	3.92
200×2	算例 1	1 025.5	1 090.2	1 140.6	6.31	11.22
	算例 2	1 098.3	1 161.6	1 207.7	5.76	9.96
	算例 3	1 196.9	1 254.1	1 292.6	4.78	8.00
300×2	算例 1	907.5	988.2	1 050.1	8.88	15.70
	算例 2	1 000.4	1 080.1	1 138.9	7.96	13.84
	算例 3	1 095.7	1 172.8	1 229.7	7.03	12.24

从表 6 可以看出,随着风电渗透水平的提高,系统的可靠性指标减小;而随着风速相关性水平的提高,系统的可靠性指标增大。同时还可以看出,风电渗透水平越高,忽略或低估风速相关性造成的系统可靠性指标的相对误差会越大。换言之,当更多的风电场或者容量更大的风电场加入到电力系统中时,忽略或低估风速相关性将带来更大的相对误差。因此,随着风电渗透水平的增加,精确模拟风速相关性将在发输电系统可靠性评估中变得越来越重要。当 2 个风电场经不同节点接入 IEEE-RTS 系统时,系统的 EENS 有所不同,即对系统可靠性贡献有所不同。因为当输电线路故障时,潮流分布不同,其他输电线路发生过负荷或系统发生解列的情况也不同。所以在研究风电场接入实际电力系统时,只考虑发电系统可靠性是不够的,需要对发输电系统可靠性进行评估。

5 结语

风速模拟是进行含风电场的发输电系统可靠性评估的基础。本文建立了一种基于 Copula 函数的多元风速相关性模型,并将其应用于含风电场发输电系统可靠性评估的蒙特卡洛模拟方法中。与常规的矩阵变换法相比,本文提出的 Copula 函数模型能够更好地用于多个风电场相关风速的模拟。算例分析表明,本文模型能够有效地应用于含多个风电场的发输电系统可靠性评估。

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

参考文献

- [1] 吴林伟,张建华,刘若溪.考虑风电机组故障的风电场可靠性模型及其应用[J].电力系统自动化,2012,36(16):31-35.
WU Linwei, ZHANG Jianhua, LIU Ruoxi. A wind farm reliability model considering wind turbine faults and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 31-35.
- [2] 刘威,赵渊,周家启,等.计及风电场的发输配电系统可靠性评估[J].电网技术,2008,32(13):69-74.
LIU Wei, ZHAO Yuan, ZHOU Jiaqi, et al. Reliability assessment of power generation transmission and distribution systems containing wind farms[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 69-74.
- [3] 吴昊,张焰,刘波.考虑风电场影响的发输电系统可靠性评估[J].电力系统保护与控制,2011,39(4):36-41.
WU Hao, ZHANG Yan, LIU Bo. Reliability assessment of generation and transmission systems considering wind farm effects[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 36-41.
- [4] 张硕,李庚银,周明.含风电场的发输电系统可靠性评估[J].中国电机工程学报,2010,30(7):8-14.
ZHANG Shuo, LI Gengyin, ZHOU Ming. Reliability assessment of generation and transmission systems integrated with wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 8-14.
- [5] XIE Kaigui, BILLITON R. Considering wind speed correlation of WECS in reliability evaluation using the time-shifting technique[J]. Electric Power System Research, 2009, 79(4): 687-693.
- [6] WANGDEE W, BILLITON R. Considering load-carrying capability and wind speed correlation of WECS in generation adequacy assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(3): 734-741.
- [7] FEIJÓO A E, CIDRÁS J, DORNELAS J L G. Wind speed simulation in wind farms forestay-state security assessment of electrical power system[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 14(4): 1582-1588.
- [8] 王海超,鲁宗相,周双喜,等.风电场发电容量可信度研究[J].中国电机工程学报,2005,25(10):103-106.
WANG Haichao, LU Zongxiang, ZHOU Shuangxi, et al. Research on the capacity credit of wind energy resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 103-106.
- [9] Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee. IEEE reliability test system [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047-2054.
- [10] 韦艳华,张世英.Copula 理论及其在金融分析上的应用[M].北京:清华大学出版社,2008.
- [11] QIN Zhilong, LI Wenyuan, XIONG Xiaofu. Estimating wind speed probability distribution using kernel density method[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(12): 2139-2146.
- [12] CHERUBINI U, LUCIANO E, VECCHIATO W. Copula methods in finance[M]. England: John Wiley & Sons, 2004.
- [13] LI Wenyuan. Risk assessment of power systems—models, methods, and applications [M]. Piscataway, USA: IEEE Press, 2005.
- [14] BILLITON R, LI Wenyuan. Reliability assessment of electrical power systems using Monte Carlo methods[M]. New York, USA: Plenum Press, 1994.
- [15] 两地区 10 年小时风速数据[EB/OL].[2012-05-15].<http://cdc.cma.gov.cn>

秦志龙(1982—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力系统规划与可靠性。E-mail: qzl19820902@163.com

李文沅(1946—),男,教授,博士生导师,加拿大工程院院士,IEEE Fellow,主要研究方向:电力系统规划、运行、可靠性和风险评估。

熊小伏(1962—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统保护与监控。

(编辑 万志超)

Reliability Assessment of Composite Generation and Transmission System Considering Wind Speed Correlation

QIN Zhilong¹, LI Wenyuan^{1,2}, XIONG Xiaofu¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. BC Hydro Company, Vancouver V7X 1V5, Canada)

Abstract: Based on the Copula function theory, this paper presents a multi-dimension correlated wind speed model and applies the model into a Monte Carlo simulation method for composite generation and transmission system reliability evaluation. Historical wind speed data is used to verify the method. It shows that wind speed correlation model offers better results for statistical properties of wind speeds including probability distributions, basic statistics and correlations than that of traditional matrix transform method. Case studies on the IEEE-RTS system with wind farms indicate that the traditional matrix transform method results in underestimation of composite system reliability index.

Key words: wind speed model; wind speed correlation; Copula function; Monte Carlo simulation