基于 Copula 理论的风光互补发电系统可靠性评估

赵继超^{1,2},袁 越^{1,2},傅质馨^{1,2},孙纯军³,钱 康³,许文超³ (1. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100;

2. 河海大学 可再生能源发电技术教育部工程研究中心. 江苏 南京 210098:

3. 江苏省电力设计院,江苏 南京 211102)

摘要:提出应用 Copula 理论建立风电场、光伏电站出力联合概率分布模型的方法。该方法不仅考虑了风电场、光伏电站出力的随机性,并且计及两者出力的相关性。根据某风光互补电站的实测出力数据,采用非参数 核密度估计法,估计风电场、光伏电站出力的概率分布。选取 Kendall 秩相关系数作为风电场、光伏电站出力 的相关性测度。利用 Frank Copula 函数,计算风电场、光伏电站出力的联合概率分布。以 RBTS 标准测试系统 作为算例,对风光互补发电系统进行可靠性评估,结果表明:建立的模型能够较好地描述风光互补发电系统 出力的概率特性,且考虑相关性的可靠性评估更接近实际情况。

关键词: Copula 理论; 核密度估计; 相关性分析; 风光互补; 风电场; 可靠性; 评估 中图分类号: TM 614; TM 615; TM 732 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.01.024

0 引言

随着可再生能源发电设备制造工艺的不断革新 以及可再生能源并网技术的持续快速发展,风力发 电、光伏发电已经成为当前可再生能源利用的2种 主要形式。然而,由于风速、光照强度等自然因素固 有的随机性和波动性,风电场、光伏电站的出力呈现 较强的间歇性和不可控性。随着间歇性电源穿透功 率的增加,可再生能源并网给电力系统带来的影响 日益突出,严重影响电力系统的安全、稳定、可靠运 行。因此,对含可再生能源的发电系统进行准确的 可靠性评估十分必要。

上述问题的关键在于建立准确的可再生能源发 电系统可靠性模型,主要方法有解析法[1-2]和蒙特卡 罗模拟法[34]。针对多个风电场之间出力的相关性研 究,文献[5]通过蒙特卡罗模拟法产生2组无相关特 性的风速向量,采用矩阵变换技术模拟风电场之间 的关联特性: 文献 [6] 采用 ARMA 时间序列法得到 具有时序特性的风速序列,在此基础上应用遗传算 法产生2组具有关联特性的风速序列。文献[7-8]在 进行风光混合发电系统的可靠性评估时,认为风电、 光伏的出力是相互独立的,并未计及风电、光伏出力 的相关性。然而,同一地区的风电、光伏出力往往具 有互补性,即负相关特性。两者之间的相关性会改 变风光互补发电系统出力的概率分布,影响发电系 统的可靠性评估。目前,关于风电场、光伏电站出力 相关性的研究尚未见到报道。为了考虑同一地区风 电场、光伏电站出力的相关性,本文提出一种应

收稿日期:2012-06-30;修回日期:2012-11-14

基金项目:江苏省电力设计院科技项目(JZ-2011-24)

用 Copula 理论建立风光互补发电系统可靠性模型的新方法。

Copula 理论可以将 1 个联合分布分解为 k 个边 缘分布和 1 个 Copula 函数,Copula 函数描述了变量 间的相关性^[9]。文献[10]应用该理论计算了冰风暴 灾害下电力断线倒塔的概率。文献[11]采用 Copula 理论,描述了多个可再生分布式电源出力的统计特 性。文献[12]基于 Copula 理论,研究了上海地区台 风条件风速和雨强联合概率分布。

本文通过江苏沿海某风光互补电站示范工程的 实测数据,采用核密度估计的方法,得到风电场、光 伏电站出力的概率分布;选取 Kendall 秩相关系数度 量两者之间的相关程度;基于 Copula 理论,建立风 光互补电站的可靠性模型;以 RBTS 标准测试系统 作为算例,采用该模型对风光互补发电系统进行可 靠性评估。

1 风电场和光伏电站出力的概率分布

建立风电场、光伏电站出力的概率模型,常采用 参数估计法,假定风速服从 Weibull 分布、光照强度 短时服从 Beta 分布,通过估计其中的参数获取概率 分布。然而,参数估计法的结果不能总令人满意,原 因在于选取的参数模型与实际的物理模型之间往往 存在较大的差距;风电场、光伏电站的出力不仅取决 于风速、光照强度,而且还受其他诸多因素的影响, 如风电场风机的布局、光伏面板的倾角等。因此,本 文根据江苏沿海某风光互补电站示范工程的实测数 据,采用非参数核密度估计法,获取风电、光伏出力 的概率分布。

1.1 核密度估计

核密度估计属于非参数检验方法之一,该方法不

需要分布的先验知识和任何概率分布形式的假设, 是一种从数据样本本身出发,研究数据分布特征的 方法^[13]。

设 x_1, x_2, \dots, x_n 为随机变量x的样本,令随机变量x的概率密度函数为f(x),则f(x)的核密度估计为^[14]:

$$f_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{j=1}^n K\left(\frac{x - x_j}{h}\right) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n K_h(x - x_j)$$
(1)

其中,*n*为样本容量;*h*为平滑系数;*K*(•)为核函数, 通常选取以0为中心的对称单峰概率密度函数。

常用的核函数以及核函数的基本性质参考文献[14]。数学理论证明,*f_h(x*)将继承核函数*K*(·)的连续性和可微性,若选用高斯核函数,则*f_h(x)*可以进行任意阶微分^[13]。

1.2 风电场和光伏电站出力的概率分布

将实测的出力数据折算成出力率,进行归一化 处理,选取风电场、光伏电站的出力率为随机变量。

设风电场的出力率为 *P*₁,其对应的概率密度为 *f*_{WT}(*P*₁);光伏电站的出力率为 *P*₂,其对应的概率密度 为 *f*_{TV}(*P*₂)。令(*p*₁₁,*p*₁₂,…,*p*_{1n})和(*p*₂₁,*p*₂₂,…,*p*_{2n})分别 为 *P*₁和 *P*₂的样本空间,*n*为样本容量。

分别将(*p*₁₁,*p*₁₂,…,*p*_{1n})和(*p*₂₁,*p*₂₂,…,*p*_{2n})代人式 (1),可估计出*f*_{WT}(*P*₁)和*f*_{PV}(*P*₂)。核密度估计图与实 测数据的频率直方图对比见图 1 和图 2。



图 1 风电场出力的概率密度曲线

Fig.1 Probability density curve of wind farm output



图 2 光伏电站出力的概率密度曲线 Fig.2 Probability density curve of PV station output

分别对 $f_{WT}(P_1)$ 和 $f_{PV}(P_2)$ 进行积分运算,可得风 电场和光伏电站出力的累积概率分布 $F_{WT}(P_1)$ 和 $F_{PV}(P_2)$,计算公式如下:

$$F_{\rm WT}(P_1) = \int_{-\infty}^{P_1} f_{\rm WT}(P_1) dP_1$$
 (2)

$$F_{\rm PV}(P_2) = \int_{-\infty}^{P_2} f_{\rm PV}(P_2) dP_2$$
(3)

经核密度估计的累积概率分布曲线与实测数据 的经验分布对比见图 3。



Fig.3 Cumulative probability distribution curve

由图 1 和图 2 可以看出,采用核密度估计法得 到的概率密度曲线与频率统计直方图基本吻合,但 概率密度函数的支撑集超出了出力率[0,1]范围,这 是由核密度估计算法的边界效应造成的。由图 3 可 以看出,采用核密度估计法得到的累积概率分布函数 曲线与经验分布基本一致,因此,可以忽略密度函数支 撑集溢出对风电场、光伏电站出力概率分布的影响。

2 Copula 理论与相关性分析

2.1 Copula 函数的定义

风电场、光伏电站的出力存在互补性,且非线性 相关,通过传统的概率理论确定两者的联合概率分 布计算复杂。Copula 理论的提出,为解决复杂高维联 合分布问题提供了一种新思路。它将联合分布问题 转化为边际分布和相关程度 2 个问题,模型实用、 有效,简化了计算。

假设 $H(\cdot, \cdot)$ 为具有边缘分布 $F(\cdot)$ 和 $G(\cdot)$ 的联合分布函数,那么存在一个 Copula 函数 $C(\cdot, \cdot)$, 满足^[9]:

$$H(x,y) = C(F(x), G(y))$$
(4)

此外,通过 Copula 函数 $C(\cdot, \cdot)$ 的密度函数 $c(\cdot, \cdot)$ 和边缘分布函数 $F(\cdot), G(\cdot),$ 可以求出分布 函数 $H(\cdot, \cdot)$ 的密度函数:

$$h(x,y) = c(F(x), G(y))f(x)g(y)$$
(5)

其中, $c(u,v) = \frac{\partial C(u,v)}{\partial u \partial v}$,u = F(x),v = G(y); $f(\cdot),g(\cdot)$

分别为 $F(\cdot)$ 、 $G(\cdot)$ 的密度函数。

在 Copula 函数族中,阿基米德 Copula 性质优良, 应用广泛。Gumbel、Clayton 和 Frank Copula 函数是 3 类常用的二元阿基米德 Copula 函数。其中 Gumbel Copula 和 Clayton Copula 函数只能描述变量间的非 负相关关系,而 Frank Copula 函数还可以描述变量间 的负相关关系。

考虑到同一地区的风电场、光伏电站的出力往往 具有互补性,即负相关特性,本文选取 Frank Copula 函数作为风电场、光伏电站出力联合概率分布的连 接函数。Frank Copula 函数的分布函数和密度函数 分别为:

$$C_{\rm F}(u,v;\theta) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{({\rm e}^{-\theta u} - 1)({\rm e}^{-\theta v} - 1)}{{\rm e}^{-\theta} - 1} \right] \qquad (6)$$

$$c_{\rm F}(u,v;\theta) = \frac{-\theta(e^{-\theta}-1)e^{-\theta(u+v)}}{[(e^{-\theta}-1)+(e^{-\theta u}-1)(e^{-\theta v}-1)]^2}$$
(7)

其中, θ 为相关参数, $\theta \neq 0$, $\theta > 0$ 表示随机变量u v正 相关, $\theta \rightarrow 0$ 表示随机变量u v趋向于独立, $\theta < 0$ 表 示随机变量u v负相关。

2.2 Copula 函数的相关性测度

Pearson 线性相关系数是目前常用的处理 2 个随机变量相关性问题的方法,如文献[6]度量 2 个风电场风速的相关性。然而,利用 Pearson 线性相关系数处理非线性相关性问题时存在如下缺陷:

a. 若随机变量的概率分布具有厚尾特性, Pearson 线性相关系数不能准确描述变量间的相关性;

b.在进行非线性变换过程后,变换前后变量间的相关程度发生变化;

c.随机变量间存在相关关系,但 Pearson 线性相关系数可能为零。

由于 Kendall 秩相关系数和 Spearman 秩相关系数在 Copula 理论中要优于 Pearson 线性相关系数^[11],因此本文采用 Kendall 秩相关系数来度量风电场、光伏电站出力的相关性。

设集合 ϕ = {(x_1, y_1), (x_2, y_2), …, (x_N, y_N)}为由随 机向量(X, Y)的 N 组观测值组成的样本空间,其中 X 和 Y 均为连续的随机变量,且 x_i 和 y_i 在时间上一 一对应。令(x_i, y_i)和(x_j, y_j)为从 ϕ 中随机选取的 2 组 观测值,i, j = 1, 2, ..., N且 $i \neq j$,如果 $x_i < x_j$ 且 $y_i < y_j$, 或者 $x_i > x_j$ 且 $y_i > y_j$,即($x_i - x_j$)($y_i - y_j$)>0,则称(x_i, y_i) 和(x_j, y_j)是一致的;类似地,如果($x_i - x_j$)($y_i - y_j$)<0, 则称(x_i, y_i)和(x_j, y_j)是不一致的。

Kendall 秩相关系数表示从样本中随机选取的 观测值 (x_i, y_i) 和 $(x_j, y_j), i \neq j$,一致的概率与不一致的 概率之差。由此可得 Kendall 秩相关系数定义的一般 形式。

令 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 为随机向量(X, Y)的任意 2 个可能值,那么 (x_i, y_i) 和 (x_i, y_j) 独立同分布,定义

 $\tau = P\{(x_i - x_j)(y_i - y_j) > 0\} - P\{(x_i - x_j)(y_i - y_j) < 0\} (8)$ 为 Kendall 秩相关系数,记为 $\tau \in [-1,1], i \neq j_{\circ}$ 式中 P 表示事件发生的概率。

若 $\tau > 0$,随机变量 $X \setminus Y$ 正相关;若 $\tau < 0$,随机变

量 $X \setminus Y$ 负相关;若 $\tau = 0$,不能确定随机变量 $X \setminus Y$ 的 相关关系。

Kendall 秩相关系数 τ 与 Frank Copula 函数中 相关参数 θ 的关系为:

$$\tau = 1 + \frac{4}{\theta} \left[D_k(\theta) - 1 \right] \tag{9}$$

其中, $D_k(\theta) = \frac{k}{\theta^k} \int_0^{\theta} \frac{t^k}{e^t - 1} dt$, $k = 1_{\circ}$

3 风光互补发电系统的可靠性模型

3.1 风光互补发电系统出力的概率分布

风光互补发电系统的出力为互补电站中风电场 和光伏电站出力之和。求取风光互补发电系统出力 的概率分布可以转化为求取互补电站中风电场、光 伏电站出力的联合概率分布。

令随机变量 P_1 和 P_2 分别为风电场和光伏电站 的出力率, $(p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1n})$ 和 $(p_{21}, p_{22}, \dots, p_{2n})$ 分别为 随机变量 P_1 和 P_2 的样本空间, n 为样本容量, 且 p_{1i} 和 p_{2i} 在时间上一一对应, 那么 (p_{1i}, p_{2i}) 和 (p_{1j}, p_{2j}) 为 独立同分布的随机向量, 其中 $i, j=1, 2, \dots, n$ 且 $i \neq j$ 。

根据 Copula 理论,风光互补发电系统中风电场、 光伏电站出力的联合概率分布可由如下步骤计算:

a. 根据样本 $(p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1n})$ 和 $(p_{21}, p_{22}, \dots, p_{2n})$, 利用式(1)进行核密度估计得到 $f_{WT}(P_1)$ 和 $f_{PV}(P_2)$;

b. 将 $f_{WT}(P_1)$ 和 $f_{PV}(P_2)$ 分别代入式(2)和(3),计 算风电场和光伏电站出力的累积概率分布 $F_{WT}(P_1)$ 和 $F_{PV}(P_2)$;

c. 将(*p*_{1i},*p*_{2i})和(*p*_{1j},*p*_{2j})代人式(8),计算风电场 和光伏电站出力的 Kendall 秩相关系数τ;

d. 将τ代入式(9),计算 Frank Copula 函数相关 参数 θ;

e. 将式(5)和式(7)联立,得到随机变量 P_1 和 P_2 的联合概率密度。

其数学表达式为:

$$h(P_1, P_2) = \frac{-\theta(e^{-\theta} - 1)e^{-\theta(u+v)} f_{WT}(P_1) f_{PV}(P_2)}{\left[(e^{-\theta} - 1) + (e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1) \right]^2}$$
(10)

其中, $u=F_{WT}(P_1)$, $v=F_{PV}(P_2)$, θ 为步骤 **d** 确定的 Frank Copula 函数的相关参数。

经计算,该风光互补示范工程中风电场、光伏电 站出力的 Kendall 秩相关系数 *τ*=-0.161,两者的联 合概率密度如图 4 所示,风电场、光伏电站出力的频 数统计直方图见图 5,实际统计的详细数据见表 1。由 图 4 和图 5 可以看出,基于 Copula 理论所建立的风 电场、光伏电站出力的联合概率密度模型,较好地刻 画了风光互补电站出力的统计特性。

3.2 风光互补发电系统的可靠性模型

为了突出问题,本文在建立风光互补发电系统的 可靠性模型时,重点考虑风电场、光伏电站出力的随 表 1 风电场和光伏电站实测出力的统计结果 Tab.1 Statistics of measured power outputs of wind farm and PV station

D	P_2									今计	
Γ_1	[0,0.1]	(0.1,0.2]	(0.2,0.3]	(0.3, 0.4]	(0.4,0.5]	(0.5,0.6]	(0.6,0.7]	(0.7,0.8]	(0.8,0.9]	(0.9,1.0]	пи
[0,0.1]	510	142	116	154	164	167	172	100	23	0	1 548
(0.1,0.2]	250	50	59	21	9	33	38	27	4	0	491
(0.2,0.3]	128	54	34	23	27	33	29	33	0	0	361
(0.3,0.4]	109	36	31	26	21	27	26	18	4	0	298
(0.4,0.5]	124	38	17	17	23	17	14	12	2	0	264
(0.5,0.6]	87	52	25	23	28	6	6	1	0	0	228
(0.6,0.7]	58	29	32	14	15	2	1	0	0	0	151
(0.7,0.8]	66	16	4	6	2	0	0	0	0	0	94
(0.8,0.9]	19	2	0	0	0	0	0	0	0	0	21
(0.9,1.0]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合计	1351	419	318	284	289	285	286	191	33	0	3456









图 5 风电场和光伏电站出力的统计直方图 Fig.5 Statistic histogram of wind-PV power outputs

机性与两者之间的相关性,暂不考虑风光互补发电 系统的元件故障特性,认为风光互补发电系统元件 完全可靠。

根据风电场、光伏电站出力的联合概率密度函数,通过积分运算得到风光互补电站的累积概率分布。设风电场装机容量为*S*₁,光伏电站装机容量为*S*₂,则风光互补发电系统总出力的累积概率分布可通过式(11)计算。

$$P(X) = \oint_{S:P_1 \in S:P_2 \leq X} h(P_1, P_2) dP_1 dP_2$$
(11)

其中,X为风光互补电站出力,P(X)为风光互补电站 出力的累积概率。

通过累积概率 P(X)形成风光互补电站出力的 停运表,由此建立风光互补电站的可靠性模型。该 模型通过 Frank Copula 连接函数的相关参数 θ ,度量 风电场和光伏电站出力之间的相关程度。因此,通过 式(11)形成的风光互补发电系统的停运表,既包含 了风电场、光伏电站出力的随机性,也包含了两者之间出力的相关性。

4 算例分析

4.1 可行性研究

以 RBTS 可靠性测试系统为研究对象,该系统装 机容量为 240 MW,其机组参数和小时负荷数据参见 文献[15-16]。选取缺电小时期望值(HLOLE)和电 量不足期望值(EENS)为可靠性指标,对算例系统进 行可靠性评估。算例将测试系统中强迫停运率为 0.02 的 40 MW 机组替换为 40 MW 的风光互补电 站,风电容量 S₁与光伏容量 S₂之比为 10:1。假定该 互补电站的风速、光照特性与江苏沿海某风光互补 示范工程相同。该工程共安装总装机容量 200.25 MW 风电机组 174 台(1.5 MW 双馈机组 93 台,0.75 MW 的鼠笼式异步风电机组 81 台);光伏电站总容量约 20.004 MW。

实际示范工程中风电、光伏全年出力的 Kendall 秩相关系数 $\tau = -0.161$,算例中互补电站与其保持一 致。同时计算了当替换容量分别为 40 MW 风电场 和 40 MW 光伏电站时的系统的可靠性指标。结果 见表 2。

表 2 可靠性指标比较(S₁:S₂=10:1)

l'ab.2	Comparison	of	reliability	$indices(S_1:S_2=10:1)$	
					1

可靠性指标	40 MW 互补发电 系统(S ₁ :S ₂ =10:1)	40 MW 风电场	40 MW 光伏电站
$\text{HLOLE}/(h \cdot a^{-1})$	15.671	15.549	18.323
$EENS/(MW \cdot h \cdot a^{-1})$	264.706	264.511	268.982

由表 2 可以看出, 互补电站对算例系统的可靠 性贡献接近于同容量的风电场, 即风电在互补电站 中起主导作用。光伏系统对算例系统可靠性的影响 被较大的风光容量比(*S*₁:*S*₂=10:1)所掩盖。

为突出光伏系统的影响,以下研究中假定 40 MW 互补电站中的风电光伏容量比为 1:1,其他计算条件保持不变。

127

将现场采集的 200 MW 风电场出力样本中每个 元素缩小至原来的 1/10,然后加上同一时刻 20 MW 光伏电站的出力,即形成风光容量比为 1:1 的 40 MW 互补电站的出力数据,根据此数据计算的可靠性指 标作为参考值。结果见表 3。

表 3 可靠性指标比较(S₁:S₂=1:1)

Tab.3 Comparison of reliability indices $(S_1; S_2-1; 1)$

$\operatorname{Hullees}(b_1 \cdot b_2 - 1 \cdot 1)$					
可靠性指标	本文方法	参考值			
$\text{HLOLE}/(\mathbf{h} \cdot \mathbf{a}^{-1})$	16.628	17.067			
$EENS/(MW \cdot h \cdot a^{-1})$	266.121	266.936			

通过比较,计算值与参考值相差很小,说明本文 提出的方法是可行的。

4.2 不同季节的可靠性评估

根据互补电站的实际运行数据,以 Kendall 秩相 关系数为相关性测度,计算一年四季风电、光伏出力 的相关性,结果见表 4。

表 4 不同季节风电光伏出力的相关性

Tab.4 Correlation of power output between wind farm and PV station for different seasons

时间段	τ
春季(3-5月)	-0.092
夏季(6-8月)	-0.346
秋季(9-11月)	-0.084
冬季(1-2、12月)	-0.289
全年(1-12月)	-0.161

由表4可以看出,夏、冬两季风电、光伏出力存 在一定的互补性;而春、秋两季风电、光伏出力仅存 在微弱的互补性。

选取 HLOLE 为可靠性指标,对算例系统进行分 季节可靠性评估。此时,互补电站出力由对应季节的 实测数据折算而来。为了便于比较考虑相关性和不 考虑相关性对可靠性指标的影响,引入相对误差:

$$\varepsilon = \left| \frac{\text{HLOLE}_{\text{is}} - \text{HLOLE}_{\text{real}}}{\text{HLOLE}_{\text{real}}} \times 100\% \right|$$
(12)

其中,HLOLE_{is}表示计算值,HLOLE_{real}表示按照由实 测数据折算而来的出力数据计算所得的参考值。不 同季节的可靠性指标见表 5。

表 5 不同季节的可靠性评估结果

Tab.5 Results of reliability assessment for different seasons

		HLO	LE/(h・季	$\varepsilon / \%$		
时间段	τ	考虑	未考虑	参考值	考虑	未考虑
		相关性	相关性		相关性	相关性
春季	-0.092	1.369	1.423	1.395	1.86	2.01
夏季	-0.346	2.419	2.605	2.473	2.18	5.34
秋季	-0.084	2.916	3.024	2.969	1.79	1.85
冬季	-0.289	9.790	10.412	9.993	2.03	4.19

由表 5 可知,在相关性较弱的春、秋两季,是否 计及相关性对系统可靠性指标影响不大;但在相关 性较强的夏、冬两季,考虑相关性的计算结果更接近 实际情况。故在风电、光伏出力相关性较弱时,可以 不考虑其相关性。但不排除某些地域的某些季节存 在较强的相关性,采用本文提出的方法可以削弱相 关性对可靠性计算带来的影响。

5 结论

本文基于江苏沿海某风光互补示范工程的实测数据,以 RBTS 标准测试系统作为算例,对风光互补发电系统进行可靠性评估,得出以下结论:

a. 基于 Copula 理论, 推导了风电场、光伏电站 出力的联合概率分布模型, 与实际统计值比较表明, 该模型较好地刻画了同一地区风电场、光伏电站出 力的联合概率分布特性;

b.建立了风光互补电站的可靠性模型,该模型 不仅考虑了风电场、光伏电站出力的随机性,同时考 虑了风电场、光伏电站出力的互补性;

c.采用本文建立的风光互补发电系统可靠性模型,对含风光互补发电系统的 RBTS 测试系统进行可 靠性评估,计算结果表明本文方法可以较好地考虑 出力相关性对可靠性的影响。

参考文献:

- 美文,严正,杨建林. 基于解析法的风电场可靠性模型[J]. 电力 自动化设备,2010,30(10):79-83.
 JIANG Wen,YAN Zheng,YANG Jianlin. Wind farm reliability model based on analytical method[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(10):79-83.
 LEITE A P,BORGES C L T,FALCAO D M. Probabilistic wind
- [2] LETTE A P, BORGES C L T, FALCAO D M. Probabilistic wind farms generation model for reliability studies applied to Brazilian sites[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(4):1493-1500.
- [3] 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.
- [4] 吴义纯,丁明. 基于蒙特卡罗仿真的风力发电系统可靠性评价[J]. 电力自动化设备,2004,24(12):70-73.

WU Yichun, DING Ming. Reliability assessment of wind power generation system based on Monte-Carlo simulation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12):70-73.

- [5] 王海超,鲁宗相,周双喜.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. Research on the capacity credit of wind energy resources[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(10):103-106.
- [6] GAO Y, BILLINTON R. Adequacy assessment of generating systems containing wind power considering wind speed correlation [J]. Renewable Power Generation, 2009, 3(2):217-226.
- [7] 梁惠施,程林,刘思革.基于蒙特卡罗模拟的含微网配电网可靠 性评估[J].电网技术,2011,35(10):76-81.
 LIANG Huishi,CHENG Lin,LIU Sige. Monte Carlo simulation based reliability evaluation of distribution system containing mi-

crogrids[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 76-81.

- [8] KISHORE L N,FERNANDEZ E. Reliability well-being assessment of PV-wind hybrid system using Monte Carlo simulation [C]// International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT). Tamil Nadu, India: IEEE, 2011: 63-68.
- [9] 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,2008:1-5.
- [10] 徐文军,杨洪明,赵俊华,等. 冰风暴灾害下电力断线倒塔的概率计算[J]. 电力系统自动化,2011,35(1):13-17.
 XU Wenjun,YANG Hongming,ZHAO Junhua, et al. Probability calculation of broken transmission lines and collapsed towers under ice storms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011,35(1):13-17.
- [11] HAGHI H V,BINA M T,GOLKAR M A,et al. 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.
- [12] 武占科,赵林,葛耀君.上海地区台风条件风速和雨强联合概 率分布统计[J]. 空气动力学报,2008,28(4):393-399.
 WU Zhanke,ZHAO Lin,GE Yaojun. Statistical analysis of wind velocity and rainfall intensity joint probability distribution of Shanghai area in typhoon condition[J]. Acta Aerodynamica Sinica,2008,28(4):393-399.
- [13] 赵渊,沈智健,周念成,等.基于序贯仿真和非参数核密度估计的大电网可靠性评估[J].电力系统自动化,2008,32(6):14-19.
 ZHAO Yuan,SHEN Zhijian,ZHOU Niancheng, et al. Reliability assessment of bulk power systems utilizing sequential simula-

tion and nonparametric Kernel density estimation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 14-19.

- [14] PARZEN E. On estimation of a probability density function and mode[J]. Annuals of Mathematical Statistics, 1962, 33(3): 1065-1076.
- [15] BILLINTON R,KUMAR S,CHOWDHURY N,et al. A reliability test system for educational purposes-basic data[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989,4(3):1238-1244.
- [16] The Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee. A reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98 (6):2047-2054.

作者简介:

赵继超(1987-),男,河北遵化人,硕士研究生,研究方向 为含可再生能源的电力系统分析(**E-mail**; jczhao@vahoo.cn);

袁 越(1966-),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统优化运行、电力系统稳定分析与

控制、可再生能源与节能新技术(E-mail: yyuan@hhu.edu.cn); 傅质馨(1983-),女,江苏徐州人,讲师,研究方向为智能

电网、可再生能源发电技术(E-mail:zhixinfu@hhu.edu.cn);

孙纯军(1976-),男,江苏盐城人,高级工程师,研究方向 为电力系统继电保护;

钱 康(1977-),男,江苏泰州人,高级工程师,研究方向 为电力系统规划:

许文超(1979-),女,江苏盐城人,高级工程师,研究方向 为电力系统规划。

Reliability assessment of wind-PV hybrid generation system based on Copula theory

ZHAO Jichao^{1,2}, YUAN Yue^{1,2}, FU Zhixin^{1,2}, SUN Chunjun³, QIAN Kang³, XU Wenchao³

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering of Ministry of Education, Hohai University,

Nanjing 210098, China; 3. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

Abstract: A joint probability distribution model based on Copula theory is proposed for the power output of wind-PV hybrid generation system, which considers the probabilistic nature of wind and PV power outputs and their correlation properties as well. The Kernel density estimation method is applied to estimate the probability densities of wind and PV power outputs based on the measured data of a real wind-PV hybrid generation system. The Kendall rank correlation coefficient is selected to measure the correlation between wind and PV powers. The Frank Copula function is used to calculate the joint probability distribution of wind and PV power outputs. Reliability assessment is carried out for the RBTS (Roy Billinton Test System) and results demonstrate that the proposed model can properly describe the probabilistic nature of wind-PV hybrid generation system and the reliability assessment considering their correlation properties is closer to real situation.

Key words: Copula theory; Kernel density estimation; correlation analysis; wind-PV hybrid system; wind farms; reliability; assessment