

## 计及风速与负荷相关性的配电网重构方法

李春燕, 杨强, 魏蔚, 罗洪飞, 张谦

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

**摘要:** 风速与负荷均受多种气候因素影响,二者具有一定相关性,因此对含风力发电的配电网进行随机潮流计算和配电网重构时应计及二者相关性的影响。基于 Copula 函数理论,提出一种计及风速与负荷相关性的配电网随机潮流算法,并以有功功率损耗期望值最小为目标函数,建立计及风速-负荷相关性的配电网重构模型。算例结果表明,所提方法能精确描述风速与负荷的相关结构,并且二者相关性的强弱对配电网随机潮流和重构结果均有一定影响。

**关键词:** 风速; 负荷; 相关性; Copula 函数; 随机潮流; 配电网重构; 风电

**中图分类号:** TM 727; TM 614

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.02.024

## 0 引言

配电网通常具有闭环设计、开环运行的特点,其上配置了较多分段开关和联络开关等,通过改变这些开关的开、合状态可以改变配电网结构。因此,配电网重构就是在满足系统约束的条件下,通过改变开关的状态来改变网络拓扑结构,从而达到降低网络损耗、平衡负荷和提高供电可靠性等目的<sup>[1]</sup>。

近年来,风力发电作为分布式发电 DG(Distributed Generation)的一种重要形式,技术发展迅猛,风电机组 WTG(Wind Turbine Generator)接入传统配电网是配电网智能化的发展趋势。但 WTG 出力的随机性和间歇性,势必会对配电网系统产生较大影响<sup>[2]</sup>。

国内外已对含 DG 的配电网重构展开研究。文献[3]基于概率模型描述风电随机出力,根据风速与输出功率间的关系,将不同功率输出作为不同场景,通过选择不同场景建立计及风电出力随机影响的配电网重构场景模型。文献[4-6]提出在重构过程中将分布式电源的输出功率和负荷视为恒定,忽略了 DG 出力的随机性特点。这些文献均基于恒定负荷模型,且未计及风速与负荷相关性的影响。在含 WTG 的配电网中,风速和负荷受多种气候因素影响而随机变化,二者具有一定相关性,并非独立随机变量,且这种相关性对配电网潮流和重构的影响不能忽略。

国内外已有一些关于风速与负荷相关性的研究。文献[7]考虑与负荷相关的温度变化对风速的影响,对风速进行自回归滑动平均 ARMA(Auto Regression Moving Average)预测,采用非参数估计的方法得到

含温度参量的时序风速。文献[8]建立了时序风速-负荷模型,研究风电容量裕度时计及负荷变化的影响。文献[9]假设风速、负荷均服从正态分布,通过二者的线性相关系数,建立了基于二元正态分布的风速与负荷相关性模型,研究了风速与负荷相关性对配电网可靠性的影响。上述文献建立的模型精度较差,且鲜有文献研究风速与负荷相关性对配电网重构的影响。文献[10]应用 Copula 理论建立了风电场、光伏电站出力联合概率分布模型,没有分析风速与负荷间的相关性,但可以借鉴该文方法进行变量间相关性的研究。文献[11]将 Copula 理论与蒙特卡洛仿真法相结合,提出了一种处理输入随机变量相关性的概率潮流计算方法,但没有分析风速与负荷的相关性对配电网重构的影响。因此,如何在配电网重构中计及风速与负荷相关性的影响,用联合分布描述二者的相关性,建立更精确的数学模型具有重要研究意义。

综上,本文通过建立基于 Copula 理论的风速与负荷相关性模型,提出了一种计及二者相关性的配电网重构优化方法。

## 1 基于 Copula 理论的风速与负荷相关性模型

## 1.1 Copula 理论

传统相关性模型在应用中存在一定不足:各随机变量边缘分布必须相同;只能解决一些特殊的多元分布;基于线性相关系数进行变换会改变原始样本的相关结构等<sup>[9,12-13]</sup>。而 Copula 函数理论因其具有很多优良的特性,可以解决这一难题。Copula 函数是一类将多元联合分布函数与变量各自的边缘分布连接在一起的函数,也称作连接函数,它描述了变量间的相关性<sup>[14]</sup>。

Sklar 定理<sup>[15]</sup>:令  $F(x_1, x_2, \dots, x_N)$  为具有边缘分布  $F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_N(x_N)$  的联合分布函数,那么存在一个 Copula 函数  $C(\cdot, \dots, \cdot)$ , 满足式(1):

收稿日期:2015-03-10;修回日期:2015-11-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51247006);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CDJZR11150005,CDJRC-10150003)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51247006) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(CDJZR11150005,CDJRC10150003)

$$F(x_1, x_2, \dots, x_N) = C(u_1, u_2, \dots, u_N) \quad (1)$$

其中,  $u_1 = F_1(x_1), u_2 = F_2(x_2), \dots, u_N = F_N(x_N)$ 。若边缘分布  $F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_N(x_N)$  连续, 则 Copula 函数  $C$  唯一确定。

Sklar 定理是 Copula 理论的应用基础。Copula 函数构造相关性模型的优点在于不必要求各变量具有相同的边缘分布, 任意边缘分布经过 Copula 函数都可以构造成联合分布, 而且几乎不会改变原始样本的相关结构, 这与传统矩阵变换法和正态变换法构造相关性模型相比更为精确。

## 1.2 Copula 函数的选取

常用的 Copula 函数有正态 Copula 函数、 $t$ -Copula 函数以及阿基米德 Copula 函数等, 由于阿基米德 Copula 函数具有构造简单、计算方便等特点, 因此本文采用阿基米德 Copula 函数来构造风速与负荷的相关性模型。

$N$  元阿基米德 Copula 函数的表达式如下<sup>[16]</sup>:

$$C(u_1, u_2, \dots, u_N) = \varphi^{-1}(\varphi(u_1) + \varphi(u_2) + \dots + \varphi(u_N)) \quad (2)$$

其中,  $\varphi(\cdot)$  为阿基米德 Copula 函数的生成元(generator),  $\varphi^{-1}(\cdot)$  为生成元的逆函数。

阿基米德 Copula 函数形式由其生成元决定, 常用的阿基米德 Copula 函数及生成元见表 1, 表中  $\theta$  为相应参数。 $\theta$  可采用极大似然估计法<sup>[17]</sup>进行估计。

表 1 阿基米德 Copula 函数生成元

Table 1 Generator for three Archimedean Copula functions

Copula 函数	生成元 $\varphi$	参数 $\theta$ 取值
Gumbel	$(-\ln u)^\theta$	$[1, +\infty)$
Frank	$\ln(e^{-\theta} - 1) - \ln(e^{-\theta u} - 1)$	$(-\infty, 0) \cup (0, +\infty)$
Clayton	$u^{-\theta} - 1$	$(0, +\infty)$

要从给定的 Copula 函数中选择出最优的一个, 需要根据一定的准则进行最优选取, 也即拟合优度评价。有多种方法可以选择最优 Copula 函数, 应用较多的是采用基于经验 Copula 函数的最短距离法<sup>[14]</sup>。经验 Copula 函数可表示为:

$$C_e\left(\frac{i_1}{M}, \frac{i_2}{M}\right) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M I(x_{1,j} \leq x_1^{i_1}, x_{2,j} \leq x_2^{i_2}) \quad (3)$$

其中,  $I(\cdot)$  为指示函数, 若括号内条件满足, 则  $I=1$ , 反之  $I=0$ ;  $x_k^i$  为顺序统计量且  $1 \leq i_1 \leq M, 1 \leq i_2 \leq M, M$  为样本容量。

经验与理论 Copula 函数之间的欧氏距离为:

$$d(C, C_e) = \sqrt{\left\{ \sum_{i_1=1}^M \sum_{i_2=1}^M \left[ C\left(\frac{i_1}{M}, \frac{i_2}{M}\right) - C_e\left(\frac{i_1}{M}, \frac{i_2}{M}\right) \right]^2 \right\}} \quad (4)$$

依据上述公式的距离大小, 选择具有最短距离的 Copula 函数作为最优 Copula, 用于描述风速与负荷随机变量间的相关结构。

## 1.3 风速与负荷的相关性建模

### 1.3.1 风速与负荷边缘分布

在以往的研究中, 风速与负荷的边缘分布模型

主要采用参数分布, 如威布尔分布、瑞利分布和正态分布等<sup>[18]</sup>。但是, 这些参数分布模型很难与实际样本分布精确拟合, 因此本文采用经验分布<sup>[19]</sup>对样本数据进行概率变换, 较之参数分布模型更加精确。

经验分布函数的表达式为:

$$\hat{F}(x) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I(X_i \leq x_0) \quad (5)$$

其中,  $M$  为样本容量;  $X_i$  为样本点;  $I(X_i \leq x_0)$  表示样本中小于或者等于  $x_0$  的样本点个数。

### 1.3.2 风力发电系统随机模型

风力发电机的输出有功功率随风速的变化而变化, 其输出功率方程为:

$$P = \begin{cases} 0 & v < v_{ci}, v > v_{co} \\ k_1 v + k_2 & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_r & v_r \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $v_{ci}, v_r$  和  $v_{co}$  分别为风力发电机的切入风速、额定风速和切出风速;  $P_r$  为额定功率;  $k_1 = \frac{P_r}{v_r - v_{ci}}$  和  $k_2 = -k_1 v_{ci}$  为系数。

本文假设风力发电机能够按恒定功率因数运行, 因此其无功出力为:

$$Q = P \tan \delta \quad (7)$$

其中,  $\delta$  为功率因数角, 一般对于并网风力发电机而言功率因数角  $\delta$  位于第四象限, 即  $\tan \delta$  为负值, 因此并网风力发电机吸收配电网的无功功率。

### 1.3.3 风速与负荷相关性模型的仿真

(1) 基于 Copula 函数的样本产生。

对于  $N$  维相关随机变量, 随机数的产生应该由多维随机变量的联合概率分布产生。基于 Copula 函数的样本产生算法有多种<sup>[14,20]</sup>, 本文采用一种基本的抽样方法, 步骤如下。

a. 产生  $N$  个服从  $(0, 1)$  均匀分布的独立随机数, 即  $Z = (z_1, z_2, z_3, \dots, z_N)$ 。

b. 根据以下公式生成服从  $N$  维 Copula 函数的随机向量  $U = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_N)$ , 即  $u_k = C_{(u_1, u_2, \dots, u_{k-1})}^{-1}(z_k)$  ( $k=1, 2, \dots, N$ ), 其中:

$$C_{(u_1, u_2, \dots, u_{k-1})}^{-1}(u_k) = \frac{\partial^{k-1} C(u_1, u_2, \dots, u_k, 1, \dots, 1)}{\partial^{k-1} C(u_1, u_2, \dots, u_{k-1})} \quad (8)$$

$$\partial_{(u_1, u_2, \dots, u_k)}^k C = \frac{\partial^k C}{\partial u_1 \partial u_2 \dots \partial u_k} \quad (9)$$

c. 将生成的随机数向量  $U$ , 根据各个随机变量各自的边缘分布  $F_k(x_k)$  进行逆变换后, 可得到满足式 (1) 的模拟样本数据。

(2) 风速与负荷相关性模型的建立步骤如下:

a. 由风速  $x_1$ 、负荷  $x_2$  的历史统计数据, 得到风速、负荷的边缘分布  $F(x_1), F(x_2)$ , 其中  $u_i = F_i(x_i)$  ( $i=1, 2$ ) 为各自对应的累积分布函数值;

b. 选择合适的 Copula 函数, 本文选取正态 Copula

以及 3 种阿基米德 Copula 函数作为风速与负荷相关性模型的备选函数;

c. 利用极大似然估计法,估计各备选 Copula 函数中的参数  $\theta$ ;

d. 计算各备选 Copula 函数经验与理论分布的欧氏距离,由最短距离法,从备选 Copula 中选择距离最小的 Copula 函数作为描述风速与负荷相关性的最优函数;

e. 由 Copula 函数的抽样方法,对已经确定的最优 Copula 函数进行模拟抽样,生成一定规模的随机数向量  $U=(u_1, u_2)$ ;

f. 将生成的随机数向量  $U$ ,根据风速与负荷各自的边缘分布  $F_k(x_k)$ 进行逆变换后,可得到计及相关性的风速与负荷的模拟样本数据。

## 2 计及风速与负荷相关性的配电网重构

### 2.1 配电网重构数学模型

配电网重构通常以降低网络损耗,提高供电可靠性、电压质量和平衡负荷等为目标,或是综合考虑上述多个指标为目标。本文以配电网的有功损耗期望值最小为目标函数,即:

$$\min F=E(\Delta P_{\text{loss}})=E\left(\sum_{i=1}^l k_i r_i \frac{P_i^2+Q_i^2}{U_i^2}\right) \quad (10)$$

其中,  $l$  为网络支路数;  $k_i$  表示支路  $i$  开合状态, 0 表示打开, 1 表示闭合;  $r_i$  为支路  $i$  电阻;  $P_i$  和  $Q_i$  分别为流过支路  $i$  的有功和无功功率;  $U_i$  为支路  $i$  末端电压。

另外,配电网重构模型还需满足一定的约束条件,如潮流约束、辐射状运行约束、节点电压约束和支路容量约束等。

### 2.2 计及风速与负荷相关性的配电网随机潮流算法

风力发电机的输出功率主要由该时刻的风速决定,由于风速的不确定性,风力发电机的输出功率具有随机性,同时负荷大小在一定时间内也具有波动性。为研究风速、负荷随机性以及风速与负荷相关性对配电网潮流的影响,基于建立的风速与负荷相关性模型,在蒙特卡洛模拟<sup>[21]</sup>计算前随机潮流的基础上,提出了一种计及风速与负荷相关性的配电网随机潮流算法,具体算法步骤如下。

a. 由最优的 Copula 函数,产生  $K_N$  组具有相关性的模拟风速与负荷序列对,由风力发电出力随机模型得到风机有功和无功功率。

b. 输入相关数据,根据蒙特卡洛模拟法计算  $K$  次确定性配电网潮流,  $K < K_N$ 。

c. 判断随机潮流计算结果的方差系数  $\eta$  是否满足蒙特卡洛模拟收敛条件。若满足,则停止增加潮流计算样本数,继续步骤 d; 若不满足,置  $K=K+1$ ,返回步骤 b。

d. 由计及风速与负荷相关性的配电网潮流计算结果,得到有功损耗、节点电压等概率分布情况。

### 2.3 计及风速与负荷相关性的配电网重构算法

由于配电网具有闭环设计、开环运行的特点,传统的遗传算法在配电网重构的遗传操作过程中会产生大量非辐射状的不可行解。本文采用基于基本回路的遗传操作方案<sup>[22]</sup>对配电网进行重构。将配电网中的所有支路闭合,记为图  $G$ ,并找出图  $G$  中的所有基本回路。配电网中的支路按图  $G$  中的基本回路按基因块编码,不在基本回路内的支路不用编码。这种编码方式既能缩短染色体长度,又可以在遗传操作中避免不可行解的产生。具体算法步骤如下:

a. 将配电网各基本回路按基因块编码,产生初始种群,使其满足各基因块内有且仅有一个 0,即各基因块只有一条打开支路,置进化代数  $g=1$ ;

b. 由计及风速与负荷相关性的蒙特卡洛配电网随机潮流算法,计算每个染色体所代表配电网的有功损耗期望值大小,并取其倒数为适应值函数,计算每个染色体的适应值;

c. 通过轮盘赌选择函数,对染色体进行选择操作;

d. 对染色体进行交叉操作,每次交叉操作只将对应基因块进行交换;

e. 对染色体进行变异操作,将某一基因块中为 0 的基因位取反变成 1,同时将基因块中为 1 的某一基因位取反变成 0;

f. 判断  $g$  是否达到最大进化代数  $g_{\max}$ ,若未达到,则置  $g=g+1$ ,返回步骤 b 继续迭代,直到达到最大进化代数为止。

具体流程图如图 1 所示。

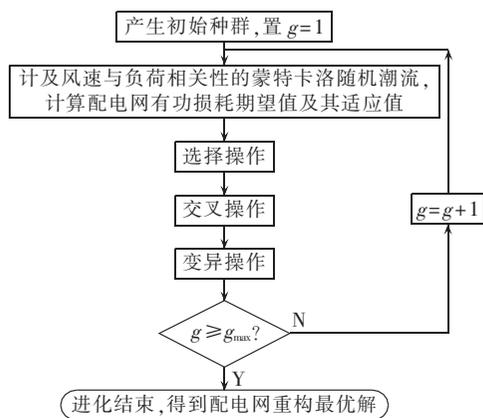


图 1 计及风速与负荷相关性的配电网重构流程图

Fig.1 Flowchart of DNR considering correlation between wind-speed and load

## 3 算例分析

### 3.1 风速与负荷相关性模拟

风速数据采用加拿大萨斯喀彻温地区一年统计风速<sup>[23]</sup>,负荷数据采用 IEEE-RTS 系统时序负荷曲

线,分别如图 2 和图 3 所示(图 3 中负荷为标么值,后同)。设  $x, y$  分别表示风速与负荷样本,则其线性相关系数  $\rho$  计算公式如下:

$$\rho = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{D(x)D(y)}} \quad (11)$$

其中,  $\text{cov}(x, y)$  为风速与负荷样本的协方差;  $D(x)$  与  $D(y)$  为其方差。

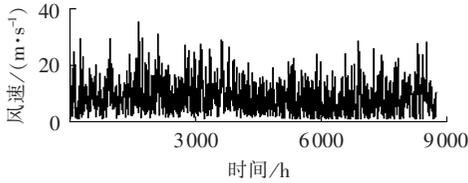


图 2 加拿大萨斯喀彻温地区 1997 年时序风速曲线  
Fig.2 1997's sequential wind-speed curve of Saskatchewan, Canada

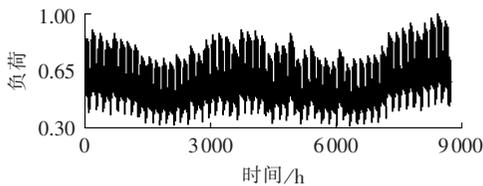


图 3 IEEE-RTS 系统时序负荷曲线

Fig.3 Sequential load curve of IEEE-RTS system

经计算风速与负荷样本的线性相关系数  $\rho = 0.2007$ , 说明样本风速与负荷存在弱的正相关性, 为了定量刻画样本风速与负荷的相关变化情况, 需要选择恰当的 Copula 函数, 本文采用以上介绍的 3 种阿基米德 Copula 函数作为备选。

用极大似然估计法对 3 种阿基米德 Copula 函数进行参数估计, 并采用最短距离法进行最优 Copula 函数的选取。理论分布和经验分布的欧氏距离见表 2。由于 Frank Copula 的距离最小, 因此 Frank Copula 是最优的 Copula 函数, 本文选择 Frank Copula 来描述样本风速与负荷的相关结构。

表 2 参数估计和欧氏距离

Table 2 Parameter estimation and Euclidean distance

Copula 函数	$\theta$	欧氏距离
Gumbel	1.1166	0.0235
Frank	1.3412	0.0047
Clayton	0.2765	0.0061

### 3.2 模拟的验证与对比

为定量和定性地评估采用 Copula 理论的风速与负荷相关性模型的准确性, 分别采用 Frank Copula 函数理论与正态变换法<sup>[9]</sup>对该系统的风速和负荷进行数据模拟, 模型对比结果如表 3 所示。可见, 本文模型的相关系数为 0.2006, 其与原始样本的相关系数非常接近; 风速、负荷均值和标准差比正态变换法更好, 说明采用本文模型进行模拟采样后的数据分布

特性与样本数据的分布特性保持一致。

表 3 模型验证与对比

Table 3 Model verification and comparison

统计量	样本		Frank Copula		正态变换法	
	风速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	负荷	风速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	负荷	风速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	负荷
均值	8.7987	0.6143	8.8071	0.6155	9.3171	0.6125
标准差	5.0449	0.1428	5.0123	0.1431	5.2051	0.1421
相关系数	0.2007		0.2006		0.1899	

图 4 和图 5 分别为 Frank Copula 函数方法和正态变换法的 P-P 图, 可以看出 Frank Copula 函数所建立的风速-负荷相关性模型与样本风速-负荷具有相近的联合概率分布特性, 拟合曲线更加接近直线。由上述结果说明, 采用 Copula 理论进行风速与负荷的相关性建模具有很高的精度。

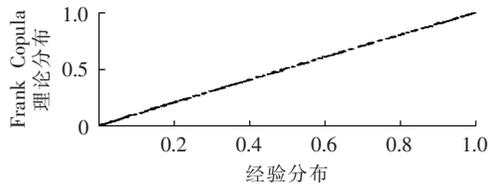


图 4 Frank Copula 函数理论的 P-P 图

Fig.4 P-P plot of Frank Copula function theory

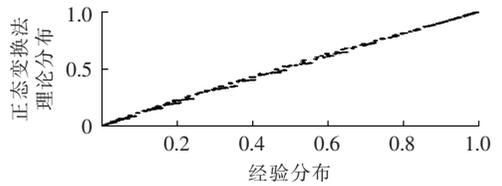


图 5 正态变换理论的 P-P 图

Fig.5 P-P plot of normal transformation

### 3.3 计及相关性的配电网随机潮流和重构结果

采用本文介绍的风速与负荷相关性模型, 对美国 PG&E69<sup>[22]</sup> 配电网进行测试分析。PG&E69 节点配电网系统额定电压为 12.66 kV, 总的负荷大小为 3 802.19 kW + 2 694.60 kvar, 共有 73 条支路, 其中有 5 个联络开关。取平衡节点电压为 1.05 p.u.,  $g_{\max} = 50$ , 种群数为 100, 初始交叉率和变异率分别为 0.9 和 0.1。假设在节点 38 和 49 处各并入额定功率为 0.5 MW 的风电机组, 其切入风速、额定风速和切出风速分别为 3 m/s、13 m/s 和 25 m/s, 功率因数为 0.98。

表 4 所示为 7 种不同情形下的配电网结构和有功损耗期望值, 其中, 情形 1 为无风力发电, 情形 2 为含风力发电、忽略风速-负荷相关性, 情形 3 为含风力发电、风速-负荷部分相关(相关系数为 0.2), 情形 4 为含风力发电、风速-负荷完全相关(相关系数为 1), 情形 5 为含风力发电、忽略风速-负荷相关性的网络重构后, 情形 6 为含风力发电、风速-负荷部分相关的网络重构后, 情形 7 为含风力发电、风速-负荷完全相关的网络重构后。表 5 为重构前后的有

功损耗期望值对比结果。首先,对比情形 1 知,风力发电接入配电网后会降低配电网的有功损耗,有效改善潮流分布,使系统能更经济地运行;其次,对比情形 2—4 知,随着风速与负荷相关性的增强,配电网的有功损耗期望值逐渐降低;情形 3 与情形 2 相比,有功损耗期望值降低了 1.18 kW(1.11%);情形 4 与情形 2 相比,有功损耗期望值降低了 5.60 kW(5.29%)。可见风速与负荷相关性的强弱对配电网有功损耗影响较大,特别是二者相关性较强时,对配电网随机潮流的影响不能忽略。图 6 为情形 2—4 的配电网有功损耗概率密度曲线,可见风速与负荷相关性的强弱对配电网有功损耗概率分布也有较大影响,当二者相关性增强时,概率分布波动范围变窄,更加密集。

表 4 配电网结构和网络损耗

Table 4 Distribution network structure and power loss

情形	联络开关集合	有功损耗期望值/kW
1	{10-65, 12-19, 14-68, 26-53, 38-47}	131.42
2	{10-65, 12-19, 14-68, 26-53, 38-47}	105.90
3	{10-65, 12-19, 14-68, 26-53, 38-47}	104.72
4	{10-65, 12-19, 14-68, 26-53, 38-47}	100.30
5	{10-65, 12-19, 13-14, 44-45, 49-50}	47.37
6	{10-65, 12-19, 13-14, 44-45, 49-50}	46.82
7	{10-65, 11-12, 12-19, 44-45, 49-50}	44.92

表 5 重构前后有功损耗期望值对比

Table 5 Comparison between expectation of active power loss before reconfiguration and that after reconfiguration

条件	有功损耗期望值/kW		有功损耗期望值减小量/kW
	重构前	重构后	
忽略风速-负荷相关性	105.90	47.37	58.53
风速-负荷部分相关	104.72	46.82	57.90
风速-负荷完全相关	100.30	44.92	55.38

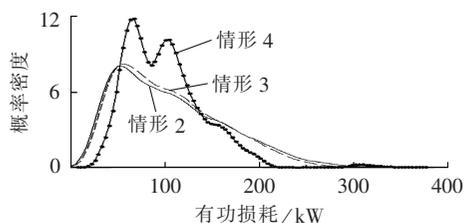


图 6 情形 2—4 配电网有功损耗概率密度曲线

Fig.6 Probability density curve of active power loss of distribution network in case 2-4

对比重构前的情形 2—4 与重构后情形 5—7,结果表明配电网重构后其有功损耗期望值较重构前初始网络有了明显的降低;由情形 5—7 可知,风速与负荷的相关性强弱不仅对配电网有功损耗期望值大小有影响,而且当二者相关性较强时也会使配电网重构方案发生一定变化,情形 5、6 的联络开

关集合为 {10-65, 12-19, 13-14, 44-45, 49-50},而当风速与负荷完全相关的情形 7 的联络开关集合为 {10-65, 12-19, 11-12, 44-45, 49-50}。因此,在对含风力发电的配电网进行配电网重构时,不能忽略风速-负荷相关性所带来的结果影响。

图 7、8 为风力发电机接入节点 38 的电压(幅值和相角)概率密度曲线(图中电压幅值和相角均为标幺值),表 6 为其电压均值和标准差(均为标幺值)。可见,风速与负荷相关性的强弱也会对配电网电压概率分布产生较大影响。情形 3 与情形 2 相比,节点 38 电压幅值与相角的均值相同而电压幅值与相角的标准差分别相差了 7.14% 与 9.52%;情形 4 与情形 2 相比,节点 38 电压幅值与相角的均值分别相差了 0.01% 与 33.33%,而其电压幅值与相角的标准差分别相差了 35.71% 与 38.10%。因此,当风速与负荷相关性较强时,不能忽略对配电网随机潮流计算所带来的误差。

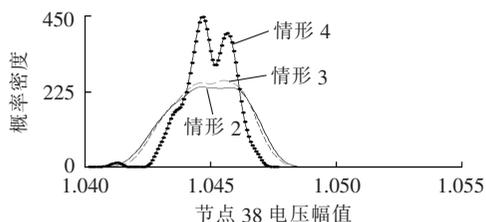


图 7 情形 2—4 节点 38 电压幅值概率密度曲线

Fig.7 Voltage amplitude probability density curve of node 38 in case 2-4

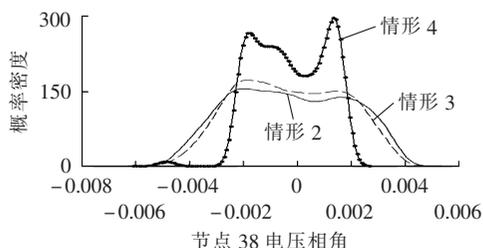


图 8 情形 2—4 节点 38 电压相角概率密度曲线

Fig.8 Voltage phase probability density curve of node 38 in case 2-4

表 6 情形 2—4 节点 38 电压均值和标准差

Table 6 Mean voltage and standard deviation of node 38 in case 2-4

情形	幅值均值	幅值标准差	相角均值	相角标准差
2	1.0449	0.0014	-0.0003	0.0021
3	1.0449	0.0013	-0.0003	0.0019
4	1.0448	0.0009	-0.0002	0.0013

## 4 结论

Copula 函数描述了随机变量间的相关结构,是构造多元相关随机变量联合分布的有力工具。本文通过建立基于 Copula 理论的风速与负荷相关性模

型,并选择最优的 Frank Copula 来描述样本风速与负荷的相关结构,实验证明该函数能够较好地解决风速与负荷相关性问题。

采用基于基本回路的遗传操作方案对算例配电网进行重构优化,结果表明风速与负荷相关性强弱对配电网随机潮流和重构方案都有一定的影响。忽略二者相关性的影响,会对配电网随机潮流计算和重构优化方案带来一定误差,从而降低对配电网优化运行与规划的参考价值。

## 参考文献:

- [1] 孙惠娟,彭春华,袁义生. 综合开关次数分析的配电网多目标动态重构[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):41-46.  
SUN Huijuan,PENG Chunhua,YUAN Yisheng. Multi-objective dynamic distribution network reconfiguration considering switching frequency[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(9):41-46.
- [2] 梁有伟,胡志坚,陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术,2003,27(12):71-75.  
LIANG Youwei,HU Zhijian,CHEN Yunping. A survey of distributed generation and its application in power system[J]. Power System Technology,2003,27(12):71-75.
- [3] 何禹清,彭建春,文明,等. 含风电的配电网重构场景模型及算法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(28):12-18.  
HE Yuqing,PENG Jianchun,WEN Ming,et al. Scenario model and algorithm for the reconfiguration of distribution network with wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(28):12-18.
- [4] 崔金兰,刘天琪,李兴源. 含有分布式发电的配电网重构研究[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(15):37-40.  
CUI Jinlan,LIU Tianqi,LI Xingyuan. Network reconfiguration at the distribution system with distributed generation[J]. Power System Protection and Control,2008,36(15):37-40.
- [5] RAYAPUDI S R,SADHU V L N,MANYALA R R,et al. Optimal network reconfiguration of large-scale distribution system using harmony search algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(3):1080-1088.
- [6] 麻秀范,崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报,2011,26(3):175-180.  
MA Xiufan,CUI Huanjun. An improved genetic algorithm for distribution network planning with distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(3):175-180.
- [7] CALLAWAY D S. Sequential reliability forecasting for wind energy: temperature dependence and probability distributions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2010,25(2):577-585.
- [8] JAYAWEERA D,ISLAM S. Probabilistic assessment of distribution network capacity for wind power generation integration[C]// Power Engineering Conference. Adelaide,SA,USA:IEEE,2009:1-6.
- [9] 孙若迪,谢开贵. 计及风速-负荷相关性的配电网可靠性评估 Monte Carlo 模拟法[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(18):12-18.  
SUN Ruodi,XIE Kaigui. Reliability evaluation of distribution networks using Monte Carlo method considering correlations between wind speed and load[J]. Power System Protection and Control,2012,40(18):12-18.
- [10] 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.
- [11] 蔡德福,石东源,陈金富. 基于 Copula 理论的计及输入随机变量相关性的概率潮流计算[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(20):13-19.  
CAI Defu,SHI Dongyuan,CHEN Jinfu. Probabilistic load flow considering correlation between input random variables based on Copula theory correlation between Copula theory[J]. Power System Protection and Control,2013,41(20):13-19.
- [12] 张里,刘俊勇,刘友波,等. 计及风速相关性的电网静态安全风险评估[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):84-89.  
ZHANG Li,LIU Junyong,LIU Youbo,et al. Static security risk assessment of power system considering wind speed correlation[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):84-89.
- [13] QIN Zhilong,LI Wenyuan,XIONG Xiaofu. Generation system reliability evaluation incorporating correlation of wind speeds with different distributions[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(1):551-558.
- [14] NELSEN R B. An introduction to Copulas[M]. New York,USA: Springer,2006:17-42.
- [15] TRIVEDI P K,ZIMMER D M. Copula modeling:an introduction for practitioners[M]. Boston,USA:Now Publishers Inc,2007:9-12.
- [16] GENEST C,MACKEY J. The joy of Copulas:bivariate distributions with uniform marginals[J]. The American Statistician,1986,40(4):280-283.
- [17] CHERUBINI U,LUCIANO E,VECCHIATO W. Copula methods in finance[M]. Cornwall,England:John Wiley & Sons,2004:153-158.
- [18] CARTA J A,RAMIREZ P,VELÁZQUEZ S. A review of wind speeds probability distributions used in wind energy analysis: case studies in the Canary Islands[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2009,13(5):933-955.
- [19] TURNBULL B W. The empirical distribution function with arbitrarily grouped,censored and truncated data[J]. Journal of the Royal Statistical Society:Series B(Methodological),1976,38(3):290-295.
- [20] 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.
- [21] LI Wenyuan. Risk assessment of power systems:models,methods and applications[M]. New York,USA:IEEE Press and John Wiley & Sons Inc,2005:79-87.
- [22] 杨建军,战红. 基于图论的改进遗传算法在配网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(21):122-125.  
YANG Jianjun,ZHAN Hong. Application of the improved genetic algorithm based on graph theory in distribution network reconfiguration[J]. Power System Protection and Control,2010,38(21):122-125.
- [23] Climate. Historical climate data of Canada[EB/OL]. [2015-03-02]. <http://climate.weather.gc.ca/>.

## 作者简介:



李春燕

李春燕(1975—),女,重庆人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统分析计算、电力市场以及智能用电(E-mail:lcyccq@cqu.edu.cn);

杨强(1990—),男,四川眉山人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行(E-mail:qyang526@163.com)。

(下转第 160 页 continued on page 160)

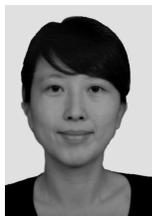
ruptions[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006. Montreal, Que, Canada:IEEE, 2006:1-8.

- [18] ZHOU Zhi, BOTTERUD A. Dynamic scheduling of operating reserves in co-optimized electricity markets with wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1):160-171.

#### 作者简介:

赵云丽(1979—),女,山东昌邑人,博士研究生,研究方向为大规模风电并网后的电网调度(**E-mail**:zhaoyunli@mail.dlut.edu.cn);

吕泉(1980—),男,山西祁县人,讲师,博士,主要研究方向为大规模风电并网后的消纳问题;



赵云丽

朱全胜(1982—),男,河南焦作人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统经济运行分析;

单茂华(1975—),男,江苏滨海人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统自动化、新能源运行与分析;

李卫东(1964—),男,辽宁铁岭人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为互联电网运行控制性能评价、大规模风电并网后的电网调度、电力市场理论与应用和电力系统运行状态显示(**E-mail**: wldli@dlut.edu.cn)。

## Spinning reserve cost apportionment for power system with wind farm

ZHAO Yunli<sup>1</sup>, LÜ Quan<sup>1</sup>, ZHU Quansheng<sup>2</sup>, SHAN Maohua<sup>3</sup>, LI Weidong<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** The concept of responsibility-based cost apportionment is proposed to lower the demand of system spinning reserve. Since the wind farm is a significantly affecting factor of system reserve demand, it is taken as a main responsible party. Since different responsible parties have different impacts on different reserve capacity segments, it is proposed to apportion the reserve capacity cost among the parties according to their responsibilities for each reserve capacity segment. Since the dispatch of system reserve causes the change of electricity purchase cost, it is adopted to apportion the reserve electricity cost among the parties who cause the reserve dispatch. Case study verifies the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** wind power integration; spinning reserve cost; responsibility-based apportionment; segment-based apportionment

(上接第 153 页 continued from page 153)

## Distribution network reconfiguration considering correlation between wind-speed and load

LI Chunyan, YANG Qiang, WEI Wei, LUO Hongfei, ZHANG Qian

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** As both wind-speed and load are affected by several climate factors, there exists a certain correlation between them, which should be considered in the SPF (Stochastic Power Flow) calculation and DNR (Distribution Network Reconfiguration). A SPF algorithm considering this correlation is proposed based on the Copula function theory and a DNR model considering this correlation and taking the minimum expectation of active power loss as its objective function is built. Results of case study show that, the proposed method can accurately describe the correlation between wind-speed and load, and the correlation degree has a certain impact on the results of SPF and DNR.

**Key words:** wind-speed; electric loads; correlation; Copula function; stochastic power flow; distribution network reconfiguration; wind power