

# 风速相关性对电力系统暂态稳定的影响

张龙, 黄家栋, 王莉莉

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

**摘要:** 大型风电场中不同风机间的风速往往会因地理位置较近而具有一定的相关性。将随机响应面法应用于系统暂态稳定分析中, 该方法能建立随机输入与输出响应之间的多项式关系, 只需少量的仿真次数便可估计响应的统计信息。采用 t-Copula 函数建立具有相关性的风速模型, 并用秩相关矩阵度量风速相关性。将变换后的风速作为随机响应面法的输入, 来研究暂态输出响应的统计特性。云南电网的算例表明, 风速相关性对系统暂态稳定有一定的影响, 考虑风速相关性会使系统暂态稳定分析更贴近实际, 对系统安全稳定运行有更明确的指导作用。

**关键词:** Copula函数; 风速相关性; 随机响应面法; 平方欧式距离; 暂态稳定

## Impact of wind speed correlation on transient stability of power system

ZHANG Long, HUANG Jia-dong, WANG Li-li

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

**Abstract:** Wind speeds of different wind turbines in a big wind farm always have correlations because of their close geographical location. This paper applies stochastic response surface method (SRSM) to analyze transient stability of power system. This method establishes polynomial relationship between inputs and transient stochastic output responses, and estimates the probability statistics of output responses by less times of simulation. Then this paper builds wind speed model by t-Copula function and uses rank correlation matrix to measure the correlations of wind speeds. Wind speed vector is transformed as the input of SRSM in order to study the probability statistics of output responses. The case study on Yunnan Power Grid shows that correlations of wind speeds have certain effect on the transient stability of power system. Taking the correlations of wind speeds into consideration makes the analysis of system's transient stability more practical, and can guide the stable operation of systems.

**Key words:** Copula function; wind speed correlation; stochastic response surface method; squared Euclidean distance; transient stability

中图分类号: TM619 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)06-0077-07

## 0 引言

大规模风电场接入电网后, 给本已存在着负荷波动、元件故障等不确定因素的电力系统带来更多挑战<sup>[1-2]</sup>。建立正确的风电场模型<sup>[3-4]</sup>, 并通过仿真计算全面反映出风电场对系统暂态稳定性的影响, 对保证对电力系统的安全稳定运行有重要意义。

现有文献对风电的研究中, 一般只考虑风电出力的随机性和间歇性<sup>[5-7]</sup>, 并假设各个风电场出力之间相互独立。事实上, 相邻多个风电场之间的风速常常存在相关性<sup>[8-9]</sup>。文献[10]研究了风速相关性对概率潮流计算结果的影响; 文献[11]研究了风速相关性对风电场节点电价的影响; 文献[12]采用三阶

多项式技术分析了风速相关性对概率最优潮流的影响。上述研究均为风速相关性对电力系统稳态特性的影响, 而风速相关性对电力系统暂态特性的影响缺乏研究。蒙特卡洛法(Monte Carlo, MC)常用来研究不确定性输入对系统暂态稳定的影响, 但仿真时间长、占用内存大。文献[13]运用随机响应面法(Stochastic Response Surface Method, SRSM)研究电力系统仿真的若干问题; 文献[14]提出了基于随机响应面法的电力系统静态电压稳定概率评估方法。

Copula函数<sup>[15-16]</sup>的秩相关度量方法可以对风速相关性进行很好的处理。文献[17]采用Copula函数建立相关风速模型, 研究了风速相关性对系统可靠

性的影响；文献[18-19]通过Copula函数建立具有相关性的风速样本及负荷样本。

本文提出一种 Copula 函数与 SRSM 相结合的方法来研究风速相关性对系统暂态稳定性的影响。通过风电场历史风速的累计概率分布函数建立 Copula 函数，得到相关风速模型；将预测的具有相关性的风速转换为独立标准正态分布向量作为 SRSM 的随机输入，建立随机输入与随机响应的混沌多项式关系，求解该方程得到多项式系数，最后得到系统响应的概率统计信息。采用云南电网实际风电场数据作为算例，分析风速相关性对该电网暂态稳定性的影响。

## 1 Copula 理论

### 1.1 Copula 函数简介

Copula 理论可以解决复杂高维联合分布问题，它将联合分布问题分解为边缘分布和相关系数两个问题。

设随机向量  $X_1, X_2, \dots, X_n$  的联合分布函数为  $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，各自的边缘分布函数为  $F_{X_1}(x_1), F_{X_2}(x_2), \dots, F_{X_n}(x_n)$ ，则存在一个 Copula 函数  $C$ ，使

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C[F_{X_1}(x_1), F_{X_2}(x_2), \dots, F_{X_n}(x_n)] \quad (1)$$

假设  $u_1, u_2, \dots, u_n$  服从  $[0, 1]$  之间的均匀分布，随机向量  $X_1, X_2, \dots, X_n$  的边缘分布函数  $F_{X_1}(x_1), F_{X_2}(x_2), \dots, F_{X_n}(x_n)$  可记为<sup>[18]</sup>

$$F_{X_i}(x_i) = u_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

边缘概率分布函数  $F_{X_i}(x_i)$  等概率逆变换，得

$$x_i = F_{X_i}^{-1}(u_i), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

则 Copula 函数式(1)可写为

$$C[u_1, u_2, \dots, u_n] = F[F_{X_1}^{-1}(u_1), F_{X_2}^{-1}(u_2), \dots, F_{X_n}^{-1}(u_n)] \quad (4)$$

由此可见，Copula 函数本质为边缘分布到联合分布的映射。常用的 Copula 函数有正态 Copula 函数、t-Copula 函数、Frank-Copula 函数等。

正态 Copula 和 Frank-Copula 函数适合于具有对称尾部，并且尾部渐近独立的随机向量；t-Copula 函数适合于具有对称尾部，并且尾部相关的随机向量；Gumbel-Copula 函数适合于具有非对称尾部，并且上尾相关、下尾渐近独立的随机向量；Clayton-Copula 函数适合于具有非对称尾部，并且下尾相关、上尾渐近独立的随机向量。

### 1.2 Copula 函数的相关性度量

在 Copula 理论中，度量随机变量间相关性的方法有很多，包括 Pearson 线性相关系数、Kendall 秩

相关系数、Spearman 秩相关系数和尾部相关系数等。由于 Kendall 秩相关系数具有在对随机变量进行严格单调并且单调性相同的变换时，秩相关系数保持不变的特性，因此本文选取 Kendall 秩相关系数来度量风速相关性。

### 1.3 对 Copula 模型的评价方法

本文引入经验 Copula 函数的概念，通过计算所选 Copula 函数与经验 Copula 函数的平方欧式距离来对所选 Copula 函数的优劣进行评价。所选的 Copula 函数到经验 Copula 函数的平方欧式距离越小，拟合效果越好。

设  $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, n)$  为取自二维总体  $(X, Y)$  的样本，记  $X, Y$  的经验分布函数分别为  $F_n(x)$  和  $G_n(y)$ ，定义经验 Copula 函数<sup>[17, 20]</sup>如下

$$\hat{C}_e(u, v) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{[F_n(x_i) \leq u]} I_{[G_n(y_i) \leq v]}, \quad u, v \in [0, 1] \quad (5)$$

式中： $I_{[\cdot]}$  为示性函数，当  $F_n(x_i) \leq u$  时， $I_{[F_n(x_i) \leq u]} = 1$ ，否则  $I_{[F_n(x_i) \leq u]} = 0$ 。

所选 Copula 函数与经验 Copula 的平方欧式距离<sup>[17]</sup>为

$$d^2 = \sum_{i=1}^n \left| \hat{C}_e(u_i, v_i) - \hat{C}_x(u_i, v_i) \right|^2 \quad (6)$$

式中： $\hat{C}_x(u, v)$  为所选的 Copula 函数； $u_i = F_n(x_i)$ ， $v_i = G_n(y_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )。

## 2 随机响应面法

SRSM 最早由 Isukapalli 在 1998 年提出。该方法通过建立输入与输出的关系式，来研究输入对输出的影响。它只需求解响应面多项式方程而无需进行大量迭代计算，在减少仿真次数的同时保持了估计输出响应的精度。采用 SRSM 研究电力系统中的相关性问题的，要选择合适的变量作为 SRSM 的随机输入，估计其对输出响应的影响。

$n$  个标准正态分布的随机变量  $\{\xi_i\}_{i=1}^n$  与对应输出响应估计值的关系式为

$$\hat{y} = a_0 + \sum_{i_1=1}^n a_{i_1} H_1(\xi_{i_1}) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^i a_{i_1 i_2} H_2(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} \sum_{i_3=1}^{i_2} a_{i_1 i_2 i_3} H_3(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \xi_{i_3}) + \dots \quad (7)$$

式中： $a_{i_1}, \dots$  为多项式系数； $H_h(\xi_{i_1}, \dots, \xi_{i_h})$  为  $h$  阶 Hermite 正交多项式，其计算公式为

$$H_h(\xi_{i_1}, \dots, \xi_{i_h}) = (-1)^h e^{\frac{1}{2}\xi^T \xi} \frac{\partial^h}{\partial \xi_{i_1} \dots \partial \xi_{i_h}} e^{-\frac{1}{2}\xi^T \xi} \quad (8)$$

Hermite 多项式阶数  $h$  及随机变量个数  $n$  共同决定了多项式系数的个数。本文采用 2 阶 SRSM 模型进行计算, 具体 2 阶 SRSM 模型多项式系数与输出响应的计算方法参见文献[15]。

### 3 计算流程

首先介绍相关性风速建模过程, 然后介绍 Copula 函数与 SRSM 相结合, 计算输出响应的详细计算流程。假设风速服从威布尔分布<sup>[21]</sup>, 具体威布尔概密度函数<sup>[22]</sup>及风机输出特性见附录 A。

#### 3.1 相关性风速建模

首先, 对历史风速作非线性变换, 将其从威布尔分布空间通过风速累积分布函数变换到均匀分布空间; 其次, 采用式(4), 通过所选 Copula 函数将均匀分布空间变换到所选 Copula 函数服从的分布空间; 最后通过威布尔逆变换将其变换到威布尔分布空间, 即得到相关性的风速。建模流程见图1。

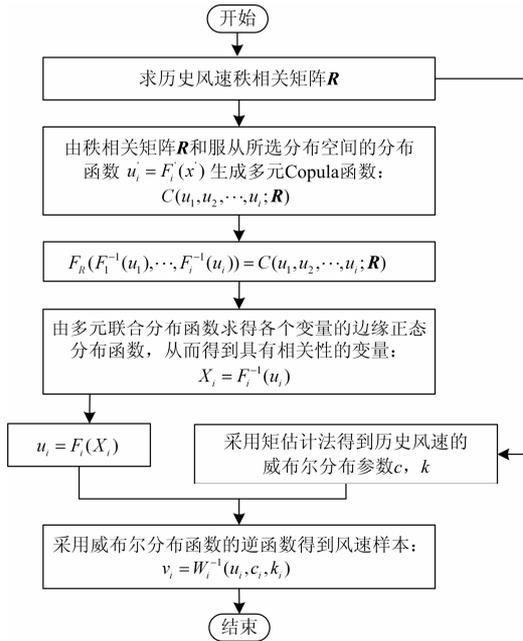


图1 风速建模流程图

Fig. 1 Wind speed modeling flow chart

#### 3.2 暂态输出期望值的计算过程

计算过程分为六部分: 一、求得风电场内历史风速的秩相关矩阵及威布尔分布参数; 二、采用所选的多元 Copula 函数建立风电场内具有相关性的风速样本, 并根据风机出力特性得到风电场总出力; 三、将风电场作为负的 PQ 节点接入系统进行暂态时域仿真计算, 得到暂态输出响应  $Y$ ; 四、将风速

建模所得的具有相关性的风速序列进行 Cholesky 正交分解, 得到独立标准正态分布向量作为 SRSM 的随机输入  $\xi_i$ ; 五、建立 SRSM 多项式函数, 由随机输入  $\xi_i$  和输出响应  $Y$  计算出 SRSM 多项式的系数; 六、由附录 A 中式(A6)计算输出响应的期望值。计算流程见图 2。

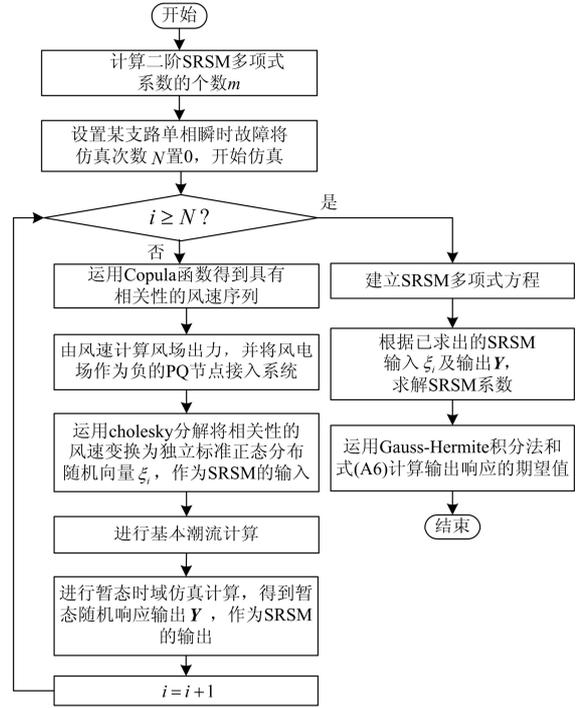


图 2 计算流程图

Fig. 2 Calculation flow chart

## 4 算例分析

### 4.1 风速序列仿真分析

选取云南电网中某山区大型风电场作为研究对象。该风电场总装机 300 MW, 单机容量 0.75 MW, 风机分布在 6 个不同的山头。对 6 个山头从 2011 年 1 月至 2011 年 12 月每月第 15 日的风速进行测量, 测量步长为 1 min, 将该数据作为研究样本, 选取合适的 Copula 函数进行建模。

首先, 选取其中一台风机某天的风速数据, 作出该风机每 2 s 风速变化概率密度曲线, 如图 3 所示。显然, 短时间内风速变化基本为 0。因此, 在进行暂态稳定分析时, 可以将风速视为定值。

其次, 选取 6 个山头中山头 1 和 2 的风速作为研究对象进行详细分析。抽取山头 1 和 2 的风速作为研究对象进行详细分析。抽取山头 1 和 2 的 10000 组历史风速数据并作出风速分布图, 如图 4 所示。图 5 所示的山头 1 和 2 风速的联合分布图表明, 两个山头的风速有一定的相关性。

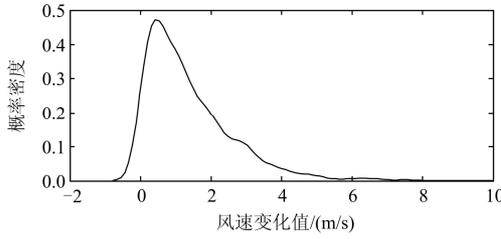


图3 每 2 s 风速变化概率密度曲线

Fig. 3 Probability density of variety of wind speed every two seconds

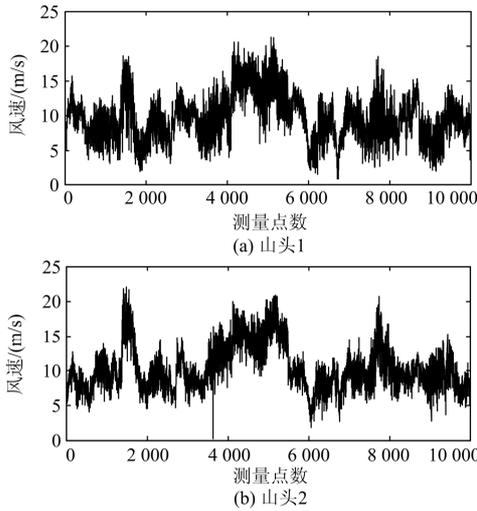


图4 山头1和山头2历史风速数据

Fig. 4 Wind speeds of mountain 1 and mountain 2

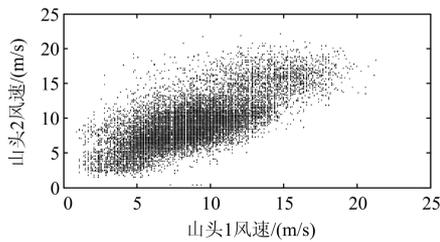


图5 山头1与山头2历史风速分布图

Fig. 5 Wind speed rank correlation of mountain 1 and 2

图6表明, 频率直方图有基本对称的尾部。因此, 选取正态 Copula 函数或 t-Copula 函数来研究其对称的尾部特性。图6的频率直方图还表明, 山头1和山头2的风速呈现出了一定的尾部相关性, 故 t-Copula 函数适合研究其尾部相关性。其他山头风速之间的尾部特性与山头1和山头2间的尾部特性类似, 限于篇幅, 本文未给出所有山头之间风速的频率直方图。因此, 选取 t-Copula 函数建立6个山头的风机联合出力模型。

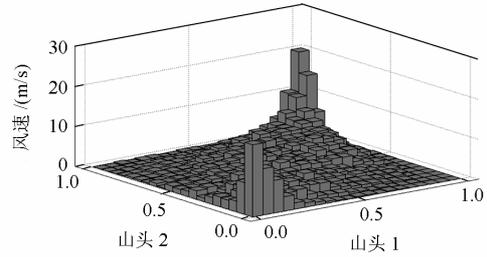


图6 山头1与山头2风速的边缘分布的频率直方图

Fig. 6 Wind speed histogram of two mountains

本文利用经验 Copula 函数, 通过计算平方欧氏距离来评价正态 Copula 和 t-Copula 函数两个模型的优劣。

二元正态 Copula 函数可以表示为

$$C_{\text{Gauss}} = \int_{-\infty}^{\phi^{-1}(u)} \int_{-\infty}^{\phi^{-1}(v)} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} \cdot \exp\left[-\frac{s^2 - 2\rho st + t^2}{2(1-\rho^2)}\right] dsdt \quad (9)$$

式中:  $\phi^{-1}(\cdot)$  表示标准正态分布函数的逆函数,  $\rho$  为变量间线性相关系数。

二元 t-Copula 函数可以表示为

$$C_t = \int_{-\infty}^{t_K^{-1}(u)} \int_{-\infty}^{t_K^{-1}(v)} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} \cdot \exp\left[-\frac{s^2 - 2\rho st + t^2}{K(1-\rho^2)}\right]^{-(K+2)/2} dsdt \quad (10)$$

式中:  $t_K^{-1}(\cdot)$  表示自由度为  $K$  的  $t$  分布函数的逆函数;  $\rho$  为变量间线性相关系数。

二元正态 Copula 函数  $C_{\text{Gauss}}(u, v)$  和二元 t-Copula 函数  $C_t(u, v)$  与经验 Copula 函数的平方欧式距离分别为

$$d_{\text{Gauss}}^2 = \sum_{i=1}^n \left| \hat{C}_e(u_i, v_i) - C_{\text{Gauss}}(u_i, v_i) \right|^2 \quad (11)$$

$$d_t^2 = \sum_{i=1}^n \left| \hat{C}_e(u_i, v_i) - C_t(u_i, v_i) \right|^2 \quad (12)$$

式中:  $\hat{C}_e(u_i, v_i)$  为经验 Copula 函数,  $u_i = F_n(x_i)$ ;  $v_i = G_n(y_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )。

由表1所示, 正态 Copula 与经验 Copula 函数的平方欧式距离大于 t-Copula 与经验 Copula 函数的平方欧式距离。因此在平方欧式距离标准下, t-Copula 函数能更好地拟合山头1和2的风速。故本文选取 t-Copula 函数来研究风速相关性。

分别在是否考虑风速相关性的情况下, 运用本节所选取的 t-Copula 函数得到两个山头的风速仿真序列, 如图7所示。

表 1 两种 Copula 与经验 Copula 函数的平方欧氏距离  
Table 1 Squared Euclidean distances between two Copula functions and empirical Copula Function

所选 Copula 函数	平方欧氏距离 $d^2$
正态 Copula	0.666 2
t-Copula	0.640 7

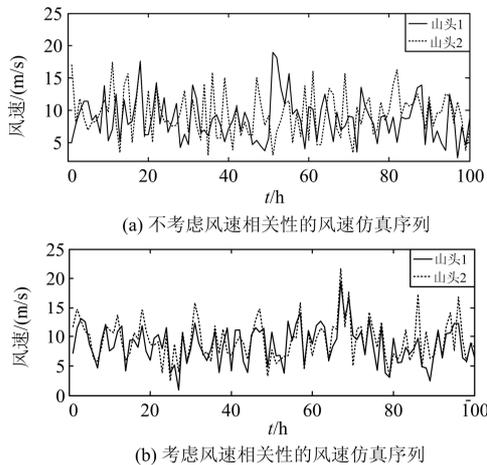


图 7 风速仿真序列

Fig. 7 Wind speeds time series

#### 4.2 实际电网算例分析

基于云南电网实际数据, 通过命令行编程方式输入数据和记录输出结果, 运用 PSD-BPA 软件进行暂态稳定计算; 采用多元 t-Copula 函数建立风电场出力模型, 运用 SRSM 研究风电场风速相关性对系统暂态稳定的影响。本文中汽轮机和水轮机发电机模型采用考虑次暂态过程的  $E_q''$  和  $E_d''$  变化模型, 并模拟了励磁机、原动机及调速器, 对于配置 PSS 的, 模拟 PSS。对于接入低电压等级 (35 kV 及以下)、小容量 (10 MW) 以下的机组, 通过等值方式模拟。风电机组采用 BPA 软件中的固定转速模型。负荷模型按照云南全省负荷模型统一设置, 即 40% 恒定功率+30% 恒定电流+30% 恒定阻抗。为了简化计算, 假设风速模型中切入风速为 4 m/s, 切出风速为 25 m/s, 平均风速为 13 m/s。每个山头的威布尔分布参数均由其历史风速通过矩估计法得出。

该风电场位于云南电网西北部, 风电场接入地区 220 kV 电网结构如图 8 所示(其中节点 XQW 为 110 kV 节点, DL500 为 500 kV 节点, 其余均为 220 kV 节点)。该地区总发电量为 1 761.8 MW, 总负荷为 847.2 MW, 220 kV 变电站有 8 座, 110 kV 变电站有 26 座, 水电站 25 座。风电场通过 110 kV 节点 XQW 接入 220 kV 主网。该地区为云南电网一个主

要的水电、风电的电源送出端。风电场附近某条线路发生单相瞬时故障, 故障发生时刻为第 50 周波, 清除时刻为第 65 周波, 每次暂态时域仿真时间为 300 周波。根据附录 A 的 SRSM 系数计算方法得到多项式系数有 28 个, 故需要进行 28 次暂态时域仿真以得到 28 组暂态输出响应。

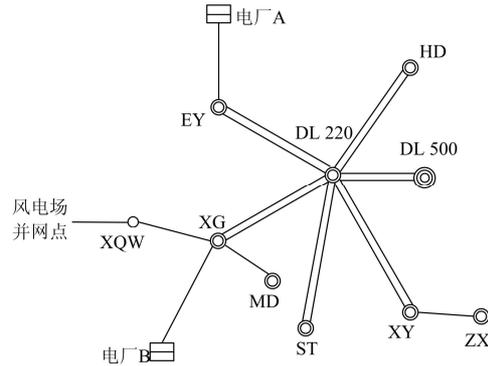


图 8 电网结构图

Fig. 8 Diagram of power grid structure

在是否考虑风速相关性两种情况下, 对该实际电网进行暂态时域仿真, 得到有关变量随时间变化的情况, 如图 9 所示, 包括风电机组的角速度、电磁转矩及无功功率。由仿真结果图 9 可知, 在进行风电场建模时, 是否考虑风速相关性对系统暂态稳定有一定影响。在发生故障时, 风电机组会加速并发生角速度、电磁转矩的振荡。由图 9(a)和图 9(b)可见, 在不考虑风速相关性的情况下, 风电机组角速度的振荡范围为 0.996 8~1.007 7 pu, 电磁转矩的振荡范围为 0.003 0~0.396 9 pu; 考虑风速相关性时, 角速度的振荡范围为 0.996 9~1.006 8 pu, 电磁转矩的振荡范围为 0.020 0~0.396 7 pu。很明显, 不考虑风速相关性时角速度和电磁转矩的振荡幅度均大于考虑风速相关性时的振荡幅度。图 9(c)所示为风电机组的无功功率。在故障发生瞬间, 由于电磁惯性的原因, 风电机组内电势高于故障端电压, 风电机组向系统倒送无功功率。由于转子磁链很快衰减完毕, 此过程也很快结束, 故障清除后风电机组从系统吸收无功功率。是否考虑风速相关性, 风电机组无功功率的变化也具有一定的差别。这是因为大型风电场内风速相关性表征了各风机在同一时刻的出力特性。若不考虑风速相关性, 仿真计算中风电场的出力比较分散; 而考虑风速相关性, 进而考虑了风场内部风机出力的相关性, 仿真计算中风机出力联系更加紧密, 减小了风电场的出力波动, 因此故障对系统暂态稳定性的影响更小。

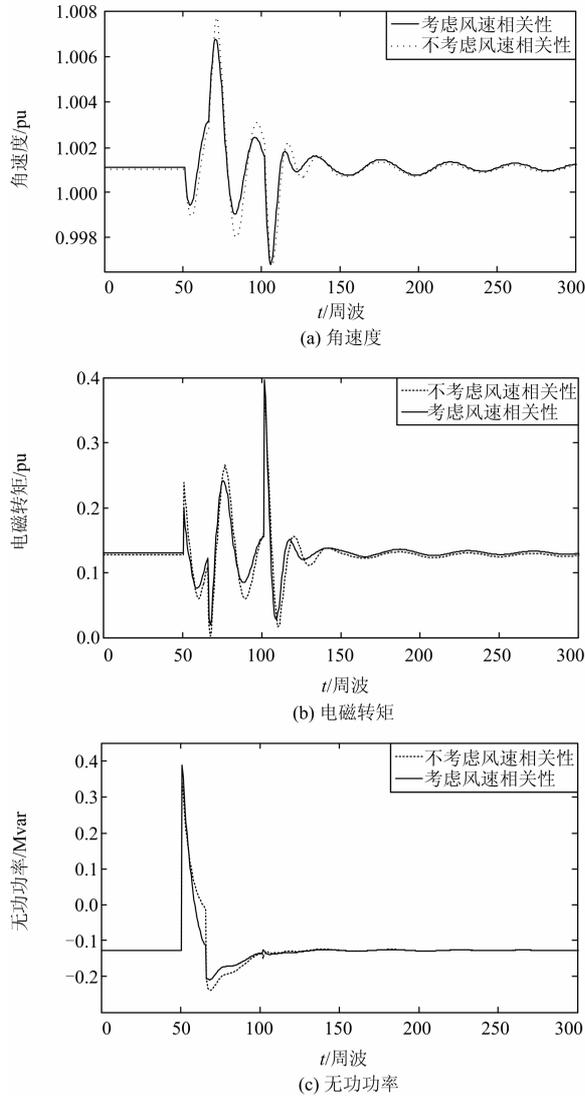


图9 风电机组有关变量的期望值

Fig. 9 Expectations to variables of wind turbines

## 5 结论

本文采用 Copula 理论, 与随机响应面法相结合, 研究了风电场风速相关性对电力系统暂态特性的影响。以云南电网实际数据为例, 在是否考虑风速相关性两种情况下, 对风电机组的角速度、电磁转矩和无功功率进行仿真计算和分析。结果表明考虑风电场风速相关性后, 能更真实地体现风电场对电力系统稳定性产生的影响。研究成果有助于提高风电调度运行精细化水平, 促进风电消纳和利用。

### 附录 A

威布尔分布的概率密度函数为

$$f(v, c, k) = \frac{k}{c^k} v^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (\text{A1})$$

式中:  $v$  为风速;  $c$  和  $k$  为尺度参数和形状参数。

在满足工程实际要求的情况下, 风机输出特性描述成分段函数形式为

$$p_w = \begin{cases} 0, & v < v_{ci}, v > v_{co} \\ \frac{v^{n'} - v_{ci}^{n'}}{v_r^{n'} - v_{ci}^{n'}} P_r, & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_r, & v_r \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (\text{A2})$$

式中:  $v_{ci}$  为切入风速,  $v_{co}$  是切出风速;  $v_r$  是额定风速;  $P_r$  为风机的额定出力;  $n'$  为风速-功率系数, 本文取 3。

### 参考文献

- [1] 何世恩, 董新洲. 大规模风电机组脱网原因分析及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 131-137.  
HE Shi-en, DONG Xin-zhou. Cause analysis on large-scale wind turbine tripping and its countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 131-137.
- [2] 黄学良, 刘志仁, 祝瑞金, 等. 大容量变速恒频风电机组接入对电网运行的影响分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 142-149.  
HUANG Xue-liang, LIU Zhi-ren, ZHU Rui-jin, et al. Impact of power system integrated with large capacity of variable speed constant frequency wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 142-149.
- [3] 米增强, 苏勋文, 杨奇逊, 等. 风电场动态等值模型的多机表征方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 162-169.  
MI Zeng-qiang, SU Xun-wen, YANG Qi-xun, et al. Multi-machine representation method for dynamic equivalent model of wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 162-169.
- [4] 黄梅, 万航羽. 在动态仿真中风电场模型的简化[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 147-152.  
HUANG Mei, WAN Hang-yu. Simplification of wind farm model for dynamic simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 147-152.
- [5] 洪芦诚, 石立宝, 姚良忠, 等. 计及风电场发电功率不确定性的电力系统模糊潮流[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 116-122.  
HONG Lu-cheng, SHI Li-bao, YAO Liang-zhong, et al. Fuzzy modelling and solution of load flow incorporating uncertainties of wind farm generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 116-122.
- [6] 田春笋, 李琼林, 宋晓凯. 风电场建模及其对接入电网稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 46-51.  
TING Chun-zheng, LI Qiong-lin, SONG Xiao-kai. Modeling and analysis of the stability for the power

- system considering the integration of the wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 37(19): 46-51.
- [7] 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): 36-42. WU Hao, ZHANG Yan, LIU Bo. Reliability assessment of generation and transmission systems considering wind farm effects[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 39(4): 36-42.
- [8] 肖创英, 王宁渤, 隄晶, 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 Chuang-ying, WANG Ning-bo, ZHI Jing, et al. Power characteristics of Jiuquan wind power base[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 64-67.
- [9] 于大洋, 韩雪山, 梁军, 等. 基于NASA地球观测数据库的区域风电功率波动特性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 77-81. YU Da-yang, HAN Xue-shan, LIANG Jun, et al. Study on the profiling of China's regional wind power fluctuation using GEOS-5 data assimilation system of National Aeronautics and Space Administration of America[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 77-81.
- [10] 蔡德福, 陈金富, 石东源, 等. 风速相关性对配电网运行特性的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 150-155. CAI De-fu, CHEN Jin-fu, SHI Dong-yuan, et al. Impact of wind speed correlation on operation characteristics of distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 150-155.
- [11] 潘雄, 周明, 孔晓民, 等. 风速相关性对最优潮流的影响[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 37-41. PAN Xiong, ZHOU Ming, KONG Xiao-min, et al. Impact of wind speed correlation on optimal power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 37-41.
- [12] 杨欢, 邹斌. 含相关性随机变量的概率最优潮流问题的蒙特卡罗模拟方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 110-115. YANG Huan, ZOU Bin. A Monte Carlo simulation method for probabilistic optimal power flow with correlated stochastic variables[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 110-115.
- [13] 韩冬, 马进, 贺仁睦, 等. 基于随机响应面法的电力系统仿真不确定性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(24): 12-16. HAN Dong, MA Jin, HE Ren-mu, et al. Uncertainty analysis based on stochastic response surface method in power system simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 12-16.
- [14] 鲍海波, 韦化. 考虑风电的电压稳定概率评估的随机响应面法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 77-85. BAO Hai-bo, WEI Hua. A stochastic response surface method for probabilistic evaluation of the voltage stability considering wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 77-85.
- [15] CHERUBINI U, MULINACCE S, GOBBI F, et al. Dynamic Copula methods in finance[M]. Chichester: Wiley, 2011.
- [16] CHERUBINI U, LUCIANO E, VECCHIATO W. Copula methods in finance[M]. Chichester: Wiley, 2004.
- [17] XIE K, LI Y, LI W. Modelling wind speed dependence in system reliability assessment using copulas[J]. IET Renewable Power Generation, 2012, 6(6): 392-399.
- [18] PAPAETHYMIOU G, KUROWICKA D. Using Copulas for modeling stochastic dependence in power system uncertainty analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(1): 40-49.
- [19] LOJOWSKA A, KUROWICKA D, PAPAETHYMIOU G, et al. Stochastic modeling of power demand due to EVS using copula[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(4): 1960-1968.
- [20] ANDERSON P M, AGRAWAL B L, VANNES J E. An introduction to Copulas[M]. New York: Springer-Verlag New York Inc, 2006: 219-220.
- [21] 徐玉琴, 刘文霞, 潘雄. MLRM 法预估含风电场系统静态电压稳定裕度[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 48-53. XU Yu-qin, LIU Wen-xia, PAN Xiong. MLRM-based estimation of static voltage stability margin of power systems with wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 48-53.
- [22] 孙若笛, 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 Ruo-di, XIE Kai-gui. 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.

收稿日期: 2013-06-12; 修回日期: 2013-09-04

作者简介:

张龙(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行控制; E-mail: zhanglong4ever@163.com

黄家栋(1961-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电力系统自动化控制, 计算机在电力系统中的应用。