

考虑多风电场出力相关性的风电容量可信度评估方法

吴耀武¹, 张联邦¹, 李海英², 娄素华¹, 杨育丰¹

(1. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 上海理工大学 电气工程学院, 上海 200093)

摘要: 风电容量可信度是衡量风力发电对电力系统可靠性贡献的重要指标, 准确快速地计算风电场可信容量是含风电系统规划的基础。处于同一风区空间位置临近风电场出力具有相关性, 采用 Copula 函数描述空间相邻风电场之间的出力相关关系, 构建多风电场出力的联合概率分布模型。在此基础上提出出力相关的多风电场容量可信度评估方法, 并采用截弦法计算得到风电场的容量可信度。以加入风电的 IEEE RTS-96 系统为例, 仿真结果验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 多风电场; 容量可信度; 出力相关性; 多状态机组; 截弦法; 风电; 评估

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.11.002

0 引言

随着风力发电技术的日益成熟和国家政策对清洁能源型新能源发展的有效激励, 中国丰富的风能资源逐渐被开发, 风电装机容量持续增长^[1-3]。风电场出力具有随机性和间歇性等特点, 属于一种不可控的电源形式, 其并网后对电力系统的容量贡献与常规机组有较大不同, 因此客观评价风电场的容量可信度对接入系统的长期规划、优化运行以及可靠性评估等相关问题具有十分重要的意义。

国内外许多专家和学者对风电容量可信度问题进行了深入的研究^[4-11]。文献[4]采用多状态机组表示风电出力的随机特性, 提出基于随机生产模拟的风电场可信容量评估方法; 文献[5]基于半不变量法建立了考虑风速变化的风电出力模型, 分析了风电出力与接入系统负荷的相关性及其对风电可信容量的影响; 文献[6-8]建立了考虑风电场停运容量的等效负荷曲线, 通过计算风电场的有效载荷容量得到风电场的容量可信度; 文献[9]将序列运算理论引入风电可信容量评估问题, 利用序列化的方法描述常规机组、风电机组以及负荷的随机性, 实现了风电可信容量的快速计算。以上文献主要针对单个风电场的可信容量评估进行了深入研究, 随着风力资源的进一步开发, 同一风区将存在多个风电场同时接入系统, 空间位置临近的风电场出力存在一定的相关性, 这将对风电场的运行和规划带来较大的影响。因此, 为准确

评估大容量风电接入对系统的容量贡献, 有必要考虑位置临近多风电场间出力相关性对可信容量的影响。

Copula 函数是一种将多个随机变量的边缘分布映射到联合概率分布的连接函数, 该函数理论上不限制边缘分布的选择, 可以捕捉变量间非线性、非对称性及尾部相关关系, 近年来在计量经济学^[10]中被广泛应用于金融、保险等领域的相关性分析, 其应用范围也在不断拓展。文献[11]将 Copula 理论引入到多风电场出力建模中, 较好地反映了风电场间存在的相关特性。

本文采用 Copula 函数建立空间相邻的多风电场出力的联合概率分布, 将风电场等效为多状态机组并入系统发电侧; 基于等可靠性准则, 利用截弦法得到了考虑多风电场出力相关性的风电容量可信度, 并分析了考虑风电出力相关性与否对计算风电容量可信度的影响。

1 风电场出力相关性分析

在中国的西北及东部沿海地区, 风能资源丰富且集中, 同一风区通常存在多个地理位置相近的风电场, 各个风电场之间的出力会由于风速的连续性而具有很强的相关性。忽略同一风区不同风电场之间出力的相关性, 将不能准确地评估风电接入电力系统所带来的影响, 增加系统运行的不安全性。图 1 所示为 2 个空间直线距离约 8.66 km 风电场小时级出力统计一周的时序曲线(图中风电出力为标幺值), 其基本信息如表 1 所示, 由图表可以得出相邻风电场出力间具有很强的相关性。

文献[12]评估了风速完全相关和完全独立时风电场接入系统对可靠性影响的不同, 但实际的风电场出力相关性应该介于两者之间。图 2 为江苏省 2 个地理位置相近的海上风电场的出力概率分布散点

收稿日期: 2014-12-15; 修回日期: 2015-09-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51207062, 51207092); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB215100); 华中科技大学自主创新基金资助项目(2013TS057)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51207062, 51207092), the National Basic Research Program of China(973 Program)(2012CB215100) and Independent Innovation Foundation of Huazhong University of Science and Technology(2013TS057)

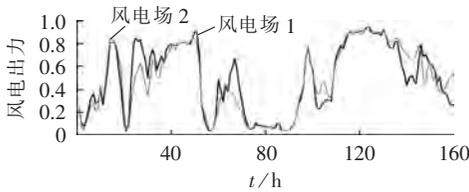


图 1 2 个风电场时序出力曲线

Fig.1 Sequential power output for two wind farms

表 1 风电场基本信息

Table 1 Basic information of wind farms

风电场	空间位置	装机容量/MW	样本容量	Pearson 相关系数
1	N45.49285° W104.32595°	214.1	168	0.948
2	N45.55218° W104.25478°	148.0	168	

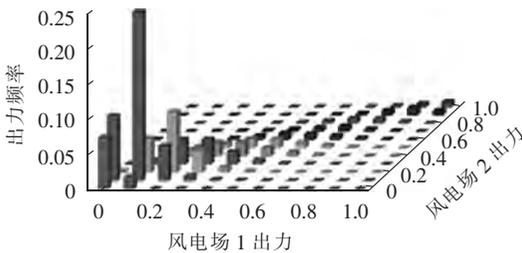


图 2 2 个风电场出力频率直方图

Fig.2 Scatter diagram of power output probability distribution for two nearby wind farms

图,图中风电场出力为标么值。从图中可以看出,风电场出力的概率分布左上方较为集中,具有明显的下厚尾特性。2 个风电场的出力具有明显的非线性不对称的相关性,而且尾部相关性更为敏感。线性与非线性相关系数对变量之间的线性或非线性相关关系进行全局的度量,不适合用于尾部这种局部特征的相关性衡量。本文将描述尾部相关结构的 Copula 函数引入多风电场出力的建模中,该函数可以包含尾部相关的全部信息,可以较好地描述多个风电场出力中存在的相关关系。

2 Copula 函数理论

Copula 函数作为一种多随机变量间的连接函数,其应用的理论基础为 Sklar 定理^[13]。

Sklar 定理: m 维随机变量 x_1, x_2, \dots, x_m , 设 H 是边缘分布函数为 $F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_m(x_m)$ 的联合分布函数,则必然存在一个 Copula 函数 C , 满足:

$$H(x_1, x_2, \dots, x_m) = C[F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_m(x_m)] \quad (1)$$

从描述的函数特征的角度, Copula 函数可分为描述下厚尾特征的 LTDC (Lower Tail Dependence Copula) 函数, 描述上厚尾特征的 UTDC (Upper Tail Dependence Copula) 函数, 描述对称分布的 SFC (Symmetric Frank Copula) 函数及基于以上 3 种函数的混合 Copula 函数。

根据风电场出力相关性的分析,其联合概率分布具有非对称、下厚尾的特点,因此可以采用 LTDC 函数对多风电场出力的联合概率分布进行建模,其数学表达式如下:

$$C_u^{\text{lo}}(x, y) = P\{X \leq F_u^{-1}(x), Y \leq F_u^{-1}(y) | X \leq u, Y \leq u\} = \frac{C[F_u^{-1}(x), F_u^{-1}(y)]}{C(u, u)} \quad (2)$$

$$F_u(x) = P\{X \leq x | X \leq u, Y \leq u\} = \frac{1 - C[\min(x, u), u]}{C(u, u)} \quad (3)$$

显然当 $u \rightarrow 0$ 时, LTDC 描述了二元随机样本在下尾部的相关结构。若 C 是一个阿基米德 Copula 函数, 当 $u \rightarrow 0$ 时 LTDC 将收敛于一个与函数 C 具有相同参数的 Calyton Copula 函数^[14]:

$$\lim_{u \rightarrow 0} C_u^{\text{lo}}(x, y) = C^{\text{cl}, \alpha}(x, y) = (x^{-\alpha} + y^{-\alpha} - 1)^{-1/\alpha} \quad (4)$$

其中, α 为联合分布函数的相关参数, $\alpha \in (0, \infty)$ 。当 $\alpha \rightarrow 0$ 时, 随机变量 x, y 趋向于独立, 即 $\lim_{\alpha \rightarrow 0} C^{\text{cl}, \alpha}(x, y) = xy$; 当 $\alpha \rightarrow \infty$ 时, 随机变量 x, y 趋向于完全相关, 即 $\lim_{\alpha \rightarrow \infty} C^{\text{cl}, \alpha}(x, y) = \min(x, y)$ 。

Calyton Copula 函数可以由二元随机变量函数扩展为多元随机变量函数, 用于描述 m 个风电场出力相关特性:

$$C(p_1, \dots, p_m) = [(F_1(p_1))^{-\alpha} + \dots + (F_m(p_m))^{-\alpha} - 1]^{-1/\alpha} \quad (5)$$

其中, p_1, \dots, p_m 为 m 个风电场的出力; $F_1(p_1), \dots, F_m(p_m)$ 为对应概率分布函数。

3 基于 Copula 函数的多风电场出力建模

3.1 确定风电场出力的边缘分布

在已知风电场出力的历史时间序列 $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 的情况下, 利用式(6)~(8)来计算各个风电场出力的离散概率分布, 基于插值逼近法对统计数据的非线性拟合将得到其单个风电场的出力分布函数作为 Copula 函数的边缘分布。其离散概率分布计算公式如下:

$$C_i = \frac{(i-1)C_N}{M-1} \quad i=1, 2, \dots, M \quad (6)$$

其中, C_i 为等效的出力状态值; C_N 为风电场额定出力; M 为离散的状态数, M 越大, 拟合效果越好。

$$p_i = n_i / n \quad (7)$$

$$n_i = \sum_{j=1}^n I\left(\frac{C_{i-1} + C_i}{2} < c_j \leq \frac{C_{i+1} + C_i}{2}\right) \quad (8)$$

其中, p_i 为出力状态 C_i 的概率值; c_j 为统计序列中某一瞬时出力值; n_i 为出力值落在 C_i 范围内点的个数; $I(\cdot)$ 为指示函数, 当括号内条件成立时取 1, 否则取 0。

3.2 构建 Copula 函数

在确定风电场出力边缘分布及 Copula 函数的基本形式后, 对其相关性参数 α 的估计成为构造 Copula 函数的关键。常用的参数估计方法为两阶段极大似

然估计。以 2 个风电场为例进行说明:2 个风电场的历史出力时间序列分别为 $\{c_{11}, c_{12}, \dots, c_{1n}\}$ 和 $\{c_{21}, c_{22}, \dots, c_{2n}\}$, 其出力边缘分布分别为 $F_1(c_{1i}; \alpha_1)$ 、 $F_2(c_{2i}; \alpha_2)$, Calyton Copula 函数为 $H_l(F_1(c_{1i}; \alpha_1), F_2(c_{2i}; \alpha_2), \alpha_h)$, α_1, α_2 边缘分布函数的参数, α_h 为联合概率分布函数的参数。

第一阶段:

$$\hat{\alpha}_1 = \operatorname{argmax} \left(\sum_{i=1}^n \ln f_1(c_{1i}; \alpha_1) \right) \quad (9)$$

$$\hat{\alpha}_2 = \operatorname{argmax} \left(\sum_{i=1}^n \ln f_2(c_{2i}; \alpha_2) \right) \quad (10)$$

第二阶段:

$$\hat{\alpha}_h = \operatorname{argmax} \left(\sum_{i=1}^n \ln h_l(f_1(c_{1i}; \hat{\alpha}_1), f_2(c_{2i}; \hat{\alpha}_2); \alpha_h) \right) \quad (11)$$

其中, $\operatorname{argmax}(\cdot)$ 表示寻找具有最大评分参量的函数; f_1, f_2, h_l 分别为函数 F_1, F_2, H_l 的概率分布函数。

本文采用计算经验联合分布函数与所选 Copula 函数的欧氏距离 ED (Euclidean Distance) 作为评价其优劣的准则。理论 Copula 函数 C 与经验联合分布 C_n 之间的欧氏距离为式 (12), 欧氏距离越小说明其拟合程度越高。

$$d(C, C_n) = \sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n [C(u_{ij}, v_{ij}) - C_n(u_{ij}, v_{ij})]^2} \quad (12)$$

其中, u_{ij}, v_{ij} 为取自两维联合概率分布的样本。

本文以江苏 2 个风电场历史出力统计数据为基础数据, 比较了描述上厚尾、下厚尾和对称分部的 Gumbel Copula, Calyton Copula 和 Frank Copula 3 类 Copula 函数对其出力联合概率分布的拟合的优劣程度, 由两阶段极大似然法迭代得到各 Copula 函数的参数, 并计算其欧氏距离。表 2 所示结果进一步验证了欧氏距离最小的 Calyton Copula 可以更好地拟合 2 个风电场出力之间的相关性。

表 2 Copula 函数参数及欧氏距离
Table 2 Parameter and ED of three Copula functions

函数	连接参数	欧氏距离
Gumbel Copula	5.35	0.1367
Calyton Copula	20.69	0.1286
Frank Copula	28.93	0.1321

4 多风电场容量可信度计算方法

根据上述方法建立多风电场出力联合概率分布, 将风电场等效为多状态机组并入原始系统, 依照随机生产模拟的思路, 首先计算含风电系统的可靠性指标, 如电力不足概率 (LOLP)、电力不足期望值 (LOLE) 和电量不足期望值 (EENS) 等; 然后计算原始系统增加一定步长容量的常规机组后的系统可靠性指标, 利用截弦法调节新增常规机组的容量, 使新系统与含风电系统的可靠性指标相差在一定的误差范围之

内, 由此迭代得到的新增常规机组的容量即可定义为风电场可信容量。多风电场可信容量计算流程如图 3 所示。

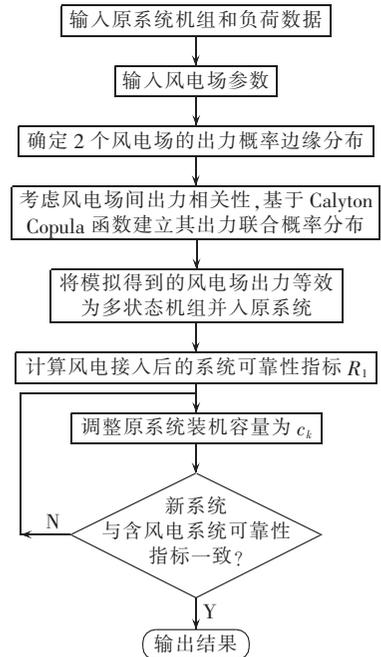


图 3 风电容量可信度评估流程图
Fig.3 Flowchart of wind-power capacity credibility assessment

通过调节新系统装机容量 c_k 可改变新系统可靠性指标, 利用截弦法迭代寻找某一新增机组容量 C_E , 使新系统可靠性系数 $R(c_k)$ 与含风电系统可靠性指标 R_1 差别满足给定精度 e :

$$\frac{R(c_k) - R_1}{R_1} \leq e \quad (13)$$

若接入电力系统的多个风电场总装机容量为 C_{wind} , 则多风电场容量可信度为:

$$C_{credit} = C_E / C_{wind} \quad (14)$$

5 算例分析

本文以 IEEE RTS-96 系统为基础, 利用本文所提方法, 进行了出力相关多风电场的容量可信度研究。该系统总装机容量为 10250 MW, 系统峰荷为 8550 MW, 具体参数见文献 [15]。在该系统中接入 2 个处于同一风区的风电场, 额定装机容量均为 512 MW。

5.1 多风电场容量可信度计算分析

根据本文所述多风电场容量可信度评估方法, 分别计算考虑相关性和不考虑相关性时两风电场的可信容量, 计算得到的各方案可靠性指标及可信容量如表 3 所示。

由表 3 可以看出, 风电场并网后系统的可靠性水平得到了明显提高。对于地理位置相近的 2 个风电场, 考虑其出力相关性后对系统中风电场的容量可信

表 3 系统的可靠性指标及风电容量可信度

Table 3 System reliability indices and wind-power capacity credibility

测试指标	并入风电场后		
	风电场前	不考虑相关性	考虑相关性
LOLP	0.000456	0.000224	0.000267
LOLE	0.165821	0.081466	0.097015
EENS/(MW·h)	38.91764	17.93124	22.00453
替代容量/MW	—	184	142
容量可信度/%	—	17.95	13.85

度比不考虑相关性时降低了 22.8%。因此,风电场出力相关程度将是影响评估同一风区内多风电场并网后的风电容量可信度水平的关键因素。

5.2 风电场出力水平对可信容量的影响

本文采用的是江苏两风电场的历史出力曲线,不同风源地区的风速不同,风速直接影响风电场的出力水平大小。本文通过改变历史平均出力水平来分析由于风源不同导致的风电场出力水平大小对容量可信度的影响。

由图 4 可见,随着风电场出力水平(标么值)的增大,风电容量可信度也在增加。在全年风速较大地区的风电场出力水平较高,会使得风电场出力的年利用小时数增大,从其对发电系统可靠性贡献的角度而言也就提高了其容量可信度。

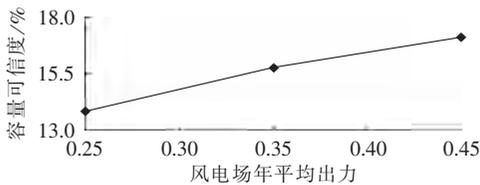


图 4 风电出力水平对容量可信度的影响

Fig.4 Influence of wind power output on capacity credibility

5.3 风电接入水平对容量可信度的影响

根据本文所述多风电场容量可信度评估方法,改变风电场群总装机容量,得到风电渗透率分别为 5%、10%、15% 和 20% 时风电容量可信度。如图 5 所示,随着风电渗透率的增加,虽然可信容量在增加,但其容量可信度逐渐降低。由此可见,风电渗透率水平是影响风电可信容量的重要因素,在含风电场的电力系统规划中应结合风电接入水平考虑风电

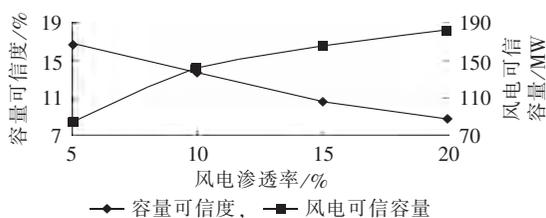


图 5 不同风电渗透率下容量可信度

Fig.5 Capacity credibility for different wind power penetrations

的容量效益。

5.4 常规机组强迫停运率对风电容量可信度的影响

本文采用常规机组的替代容量衡量风电的容量可信度,因此,被替代常规机组的强迫停运率(FOR)的大小会对风电可信容量产生影响。图 6 给出替代常规机组强迫停运率分别为 0.06、0.08、0.10 和 0.12,风电渗透率水平分别为 10%、15% 和 20% 时风电容量可信度变化趋势。

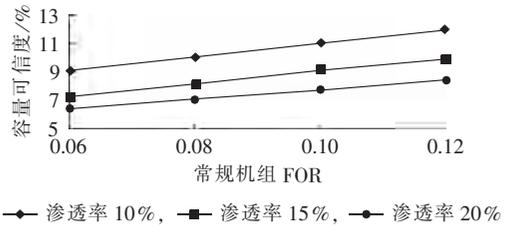


图 6 替代机组不同强迫停运率下容量可信度

Fig.6 Capacity credibility for different forced outage rates of substitutive unit

由图 6 可见,替代的常规机组强迫停运率越高时,相同风电场的风电容量可信度也越高。这主要是由于常规替代机组的强迫停运率越高,单位容量对系统的可靠性贡献就越低,在相同的总可靠性贡献的前提下,等效的风电容量贡献值就越高。因此,采用容量可信度衡量风电对电力系统可靠性的影响时需考虑接入系统未来规划的主力常规电源可靠性参数。

6 结论

为准确评估大容量风电接入对系统的容量贡献,有必要考虑位置临近多风电场间出力相关性对可信容量的影响。本文基于 Copula 函数提出了考虑多风电场出力相关性的风电容量可信度评估方法,该方法利用 Calyton Copula 函数拟合处于同一风区的多风电场出力的联合概率分布;将风电场等效为多状态机组通过随机生产模拟计算含风电系统的可靠性水平,并采用截弦法进行常规机组替代容量的迭代,在保证计算精度的前提下,实现了对多风电场容量可信度的快速计算。

本文对接入两风电场后的 IEEE RTS-96 系统进行了多风电场容量可信度的计算,并分析了风电场相关性对风电场容量可信度的影响。计算结果表明,评估空间位置临近风电场对接入系统的容量贡献时,需要考虑其出力相关关系;在灵敏度分析中计算了风电接入水平、常规机组强迫停运率参数等因素对风电容量可信度的影响;随着风电渗透率的增加,风电容量可信度逐渐降低;替代机组的强迫停运率参数对风电容量可信度评估结果也有较大影响,因此在实际风电场的可信度评估中应根据接入系统的电源特性选取合适的可靠性参数。

参考文献:

- [1] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2012 年中国风电装机容量统计[J]. 风能, 2013, 1(3): 44-55.
Chinese Wind Energy Association. Chinese wind power installed capacity in 2012[J]. Wind Energy, 2013, 1(3): 44-55.
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 可再生能源发展“十二五”规划[R]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2011.
- [3] 袁小明, 程时杰, 文劲宇. 储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 14-18.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, WEN Jinyu. Prospects analysis of energy storage application in grid integration of large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 14-18.
- [4] KARKI R, POAND H, BILLINTON R. A simplified wind power generation model for reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 533-540.
- [5] 梁双, 胡学浩. 考虑风速变化特性的风电容量可信度评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 18-27.
LIANG Shuang, HU Xuehao. Capacity credit evaluation of wind generation considering wind speed variation characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 18-27.
- [6] VALLEE F, LOBRY J, DEBLECKER O. System reliability assessment method for wind power integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1288-1297.
- [7] AMELIN M. Comparison of capacity credit calculation methods for conventional power plants and wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 685-691.
- [8] 吴义纯, 丁明, 李生虎. 风电场对输电系统可靠性影响的评估[J]. 电工技术学报, 2004, 19(11): 72-76.
WU Yichun, DING Ming, LI Shenghu. Reliability assessment of wind farms in generation and transmission systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(11): 72-76.
- [9] 张宁, 康重庆, 陈治坪, 等. 基于序列运算的风电可信容量计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 1-9.
ZHANG Ning, KANG Chongqing, CHEN Zhiping, et al. Wind power credible capacity evaluation model based on sequence operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 1-9.
- [10] 韦艳华. Copula 理论及其在多变量金融时间序列分析上的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
WEI Yanhua. Copula theory and its applications in multivariate financial time series analysis[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [11] 黎静华, 文劲宇, 程时杰, 等. 考虑多风电场出力 Copula 相关关系的场景生成方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 30-36.
LI Jinghua, WEN Jinyu, CHENG Shijie, et al. A scene generation method considering copula correlation relationship of multi-wind farms power[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 30-36.
- [12] 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 Lucheng, SHI Libao, YAO Liangzhong, et al. Fuzzy modeling and solution of load flow incorporating uncertainties of wind farm generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 116-122.
- [13] 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.
- [14] Reliability Test System Task Force. IEEE reliability test system-1996[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 1010-1020.

作者简介:



吴耀武

吴耀武(1963—), 男, 湖北黄冈人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统规划与可靠性、电力系统运行分析;

张联邦(1990—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统规划与可靠性、新能源发电和电力系统优化运行(E-mail: lb-zhang@foxmail.com);

姜素华(1974—), 女, 辽宁锦州人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统规划与可靠性、新能源发电接入和电力技术经济。

Wind-power capacity credibility assessment considering power output correlation of multiple wind farms

WU Yaowu¹, ZHANG Lianbang¹, LI Haiying², LOU Suhua¹, YANG Yufeng¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The wind-power capacity credibility is an important indicator to measure its contribution to power system reliability and the quick and accurate calculation of wind-power credible capacity is the foundation of system planning including wind power. There is the power output correlation among nearby wind farms in same wind area, which is described by Copula function for building the joint power output probability distribution model of multiple wind farms. A method of capacity credibility assessment considering the power output correlation of multiple wind farms is proposed and the secant method is adopted to calculate the capacity credibility of wind farm. As an example, the simulative results for IEEE RTS-96 system with added wind power show the correctness and effectiveness of the proposed method.

Key words: multiple wind farms; capacity credibility; power output correlation; polymorphic generator; secant method; wind power; assessment