

风电场群送出工程容量优化研究

文/国网福建省电力有限公司经济技术研究院 林章岁 叶 荣
福州大学电气工程与自动化学院 王燕彬 温步瀛

基于Copula理论的风电场群出力建模

1. 基于Gumbel Copula理论的联合分布函数

随着大规模风电场的并网，风电场之间的相关性对电力系统的影响受到越来越多研究者的关注。近年来，一种基于Copula理论的统计方法被广泛应用于研究随机变量间的相关性。“Copula”的含义是“连接、结合”。

由于风电场群存在多个风电场地理位置毗邻的情况，所在地理位置基本处于同一风带，不同风电场的风速之间具有较强的相关性，使得风电场汇聚后的功率特性与单个风电场输出的功率特性差异性较大，为此本文采用Copula函数对风电场群出力进行建模。

常用的Copula函数有Frank Copula, Gumbel Copula和Clayton Copula函数。其中Gumbel Copula函数具有上尾部相关系数大、下尾部相关系数小的特点，而风电场最大出力之间也具有显著的上厚尾相关性。因此，本文采用Gumbel Copula函数对风电场群出

力联合分布进行建模。

Gumbel Copula函数的分布函数为

$$C(u_1, u_2, \dots, u_n; \theta) = \exp \left(- \left(\sum_{i=1}^n (-\ln u_i)^\theta \right)^{1/\theta} \right) \quad (1)$$

式中，联接参数 θ 为优化变量， $0 < \theta < 1$ ，当 θ 趋近于0，则变量相关性越强； $u_i = F_{v_i}(v_i; c_i, k_i)$ v_i 表示第 i 个风电场的风速分布函数； c_i 表示第 i 个风电场的尺度参数； k_i 表示第 i 个风电场的形状参数； n 表示有 n 个风电场。

2. Gumbel Copula联合分布参数估计

在时间跨度较长的情况下，各风电场的出力分布在不同时段存在一定的差异性，因此须分时段进行考虑。本文采用极大似然法对尺度参数 c 、形状参数 k 和联接参数 θ 进行估计，其目标函数为

$$\max L_{i,t}(c_{i,t}, k_{i,t}) = \prod_{j=1}^m \frac{dF_{v_{i,t}}(v_{i,t}; c_{i,t}, k_{i,t})}{dv_{i,t}} \quad (2)$$

式中， $L_{i,t}(c_{i,t}, k_{i,t})$ 表示极大似然函数； t 表示第 t 个时段， $u_{i,t} = F_{v_i}(v_{i,t}; c_{i,t}, k_{i,t})$ 表示第 i 个风电场在第 t 个时段的风速分布； $v_{i,t}$ 表示第 i 个风电场在第 t 个时段的风速；

$c_{i,t}$ 表示第 i 个风电场在第 t 个时段风速的尺度参数； $k_{i,t}$ 表示第 i 个风电场在第 t 个时段风速的形状参数； n 表示有 n 个风电场； $u_{i,t}^j$ 表示第 i 个风电场在第 t 个时段风速分布的第 j 个样本值； m 表示每个风电场风速分布的样本点数。

通过式(2)估计得到各风电场在各时段的尺度参数 $c_{i,t}$ 和形状参数 $k_{i,t}$ ，从而得到各风电场各时段的风速分布。

$$\max L_t(\theta_t) = \prod_{j=1}^m \frac{\partial^n C(u_{1,t}, u_{2,t}, \dots, u_{n,t}; \theta_t)}{\partial u_{1,t} \partial u_{2,t} \dots \partial u_{n,t}} \quad (3)$$

式中， $L_t(\theta_t)$ 表示极大似然函数； t 表示第 t 个时段，联接参数 θ_t 为优化变量， $0 < \theta_t < 1$ ，当 θ_t 趋近于0，则变量相关性越强，表示第 i 个风电场在第 t 个时段的风速分布。

因此，首先通过式(3)估计出联接参数 θ_t ，然后将其代入到式(1)计算，从而得到风电场群Copula联合分布函数。

3. 拉丁超立方抽样

由于总体分布数据量大，因此采用随机抽样对有代表性的数据性进行研究。而在进行随机抽

基金项目：福建省自然科学基金(2013J1176)

样时,每次抽样都是独立的,因此,在进行抽样规模不大的随机抽样时,容易出现抽样点都聚集在高概率区域范围内的情况。而分层抽样技术克服了这方面的不足,充分考虑低概率抽样点对结果的影响,可以在保证精度的情况下尽可能地减少抽样次数。

拉丁超立方抽样属于分层抽样,是一种能通过抽样值有效地反映随机变量整体分布的方法,确保抽样区域可以被抽样点全部覆盖。所以,采用拉丁超立方对风电场群联合出力分布进行抽样。

风电场群外送线路容量优化模型

在对风电场群外送线路容量进行规划时,采用前文所述方法得到的风电场群持续出力特性曲线表示风电场群输出功率的整体波动特性。综合考虑电网输电收益、输电工程建设成本以及由于输电阻塞造成的弃风损失等因素,建立以输电工程综合收益大目标的输电容量优化模型。

目标函数具体形式为

$$\begin{aligned} \max_{P_{\text{line}}, P_{\text{N}}} f &= R(P_{\text{line}}) - [C(P_{\text{line}}) + L(P_{\text{line}})] \\ &= K_r G_{\text{wind}} T_s - [K_c P_{\text{line}} L + K_l G_{\text{lost}} T_s] \end{aligned} \quad (4)$$

式中, f 为风电外送输电工程全回收周期综合收益; $R(P_{\text{line}})$ 为电网输电收益; K_r 为输电企业输送单位风电电量的费用,元/(kW·h); G_{wind} 为输电工程每年送出的风力发电电量; T_s 为输电投资静态回收周期; $C(P_{\text{line}})$ 为输电工程建设成本; K_c 为单位容量、单位长度的输电工程造价; L 为输电距离; $L(P_{\text{line}})$ 为由于输电阻塞造成的弃风损失价值; K_l 为电网输电阻塞造成风电弃风损失的单价按风电

发电单价计算); G_{lost} 为电网输电阻塞造成的风电弃风损失电量; P_{line} 为风电外送输电线路容量; K_N 为风电场群总装机容量。

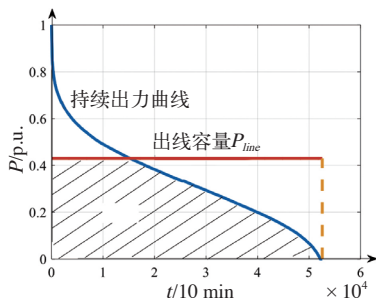


图1 风电外送输电容量计算原理示意图

由图1可知,在已知风电场持续出力特性的情况下,虽然增加出线容量 P_{line} 可以更好地减少弃风损失,但需要增加输电线路的投资成本;反之,若一味地减少输电线路的投资成本,又会导致更严重的输电阻塞,从而增加了弃风损失。所以在对风电场群外送输电容量规划时,须通过目标优化求取最优的输电容量。

模型求解

本文采用分时段参数估计,首先将一年分成12个月,利用每个月各风电场的风速数据通过式(2)对尺度参数 $c_{i,t}$ 和形状参数 $k_{i,t}$ 进行参数估计获得各风电场的风速分布;再利用Gumbel Copula函数联合各风电场的风速分布,对式(3)中的联接参数 $\theta_{i,t}$ 进行极大似然估计;然后对联合分布进行拉丁超立方抽样并根据风功率模型将风速转化为风电出力,获得时序功率曲线;再将时序功率曲线按从大到小排序获得持续出力曲线;然后基于随机模拟的粒子群算法求解最优出线容量 P_{line} 使得输电工程的综合收益 f 最大。

算例分析

本文利用某地区3个风电场一年的实测风速数据,基于Gumbel Copula理论对3个风电场构成的风电场群出力进行相关性建模,最后利用得到的持续出力曲线对送出工程容量进行优化。

基本参数:风电场群由3个风电场组成,各风电场装机容量分别为40 MW、30 MW和30 MW,则其总装机容量为100 MW;时间周期取1年,分成12个月;风电场风机的切入风速、切出风速、额定风速分别为4m/s、25 m/s和15 m/s;输电企业输送单位风电电量的费用 $k_r=0.06$ 元/(kW·h), $L=200$ km, $k_c=100$ 万元/(MW·100 km), $k_l=0.6$ 元/(kW·h), $T_s=20$ 年。

1. 风电场群持续出力曲线

各月份风电场的Weibull分布和Copula联合分布参数估计结果如表1所示。

由表1的参数估计优化结果可得出该地区风电场群的12个Gumbel Copula联合分布,再对每个联合分布分别进行拉丁超立方抽样得到该地区风电场群一年的时序功率曲线,抽样频率为每10 min抽样一次,最后对时序功率曲线按从大到小排序,获得该地区风电场群的持续出力曲线,如图2中的实线所示。同时,采用直接叠加各风电场持续出力曲线得到该地区风电场群的持续出力曲线如图2中虚线所示。

由图2可知,考虑各风电场风速的相关性后,风电场群汇聚的总功率特性与未考虑相关性相比有显著的区别,最大出力占总装机容量的比例明显下降,持续出力曲线更为平缓,表明本文对风

表1 各月份风电场参数估计结果

月份 t	风电场 i	联接参数 $\theta_{i,t}$	尺度参数 $c_{i,t}$	形状参数 $k_{i,t}$
1	1	0.069 2	7.362 8	2.034 0
	2		6.157 2	2.572 2
	3		7.493 3	2.216 8
2	1	0.025 4	7.545 5	2.006 4
	2		7.073 0	2.637 0
	3		7.493 3	2.316 8
3	1	0.155 5	5.444 4	2.004 0
	2		4.008 3	2.214 47
	3		4.827 2	2.117 3
4	1	0.127 3	4.514 9	1.975 5
	2		2.974 4	2.153 1
	3		3.712 2	2.100 7
5	1	0.028 7	3.563 4	2.016 6
	2		1.947 3	2.164 1
	3		2.834 3	2.099 8
6	1	0.109 5	2.448 3	2.001 4
	2		3.091 0	2.225 6
	3		2.816 0	2.090 3
7	1	0.069 2	7.533 7	2.007 0
	2		6.036 8	2.198 9
	3		6.745 1	2.100 3
8	1	0.048 4	7.439 9	1.977 7
	2		6.002 3	2.230 9
	3		6.832 7	2.129 9
9	1	0.088 9	7.533 1	1.981 3
	2		5.972 6	2.188 3
	3		6.719 0	2.078 6
10	1	0.006 0	7.476 6	1.985 3
	2		5.995 6	2.200 8
	3		6.742 1	2.120 1
11	1	0.075 1	7.491 3	2.033 3
	2		5.978 5	2.183 4
	3		6.815 7	2.113 2
12	1	0.076 0	7.607 3	2.013 7
	2		6.047 0	2.224 0
	3		6.765 4	2.119 4

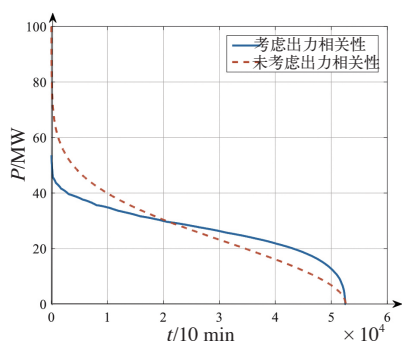


图2 持续出力曲线

风电场群出力的建模更符合实际风电场群的“汇聚效应”。

2. 风电场群最优输电容量优化

根据图2的持续出力曲线对外送输电工程的综合收益进行优化，通过粒子群优化算法得到输电工程的综合收益与出线容量的关系如图3所示。

由图3可知，输电工程的综合收益存在某个最大值，最大值为 $f = 2.34$ 亿元，对应的出线容量 $P_{\text{line}} = P^* = 47.48$ MW。当出线容量小

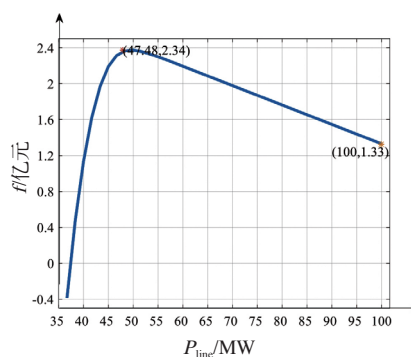


图3 风电送出最优输电容量示意图

于最优出线容量 P^* ，会因为弃风损失而减少综合收益；当出线容量大于最优出线容量 P^* ，会因为输电工程的成本提高而使综合收益减少。如果外送输电线路容量按装机容量 100 MW 进行规划，将出现外送输电线路容量严重冗余的局面，造成资源的严重浪费，且其输电工程的综合收益仅为本文模型的 56.84%，经济效益差。

结束语

本文利用 Gumbel Copula 函数对风电场群的出力分布进行描述，综合考虑风电场出力上厚尾相关性。主要研究结论如下：

(1) 考虑各风电场风速的相关性后，风电最大发电功率占总装机容量的比例下降，风电年持续出力曲线趋于平缓，更符合实际情况地描述了风电场群联合送出呈现出的“汇聚效应”

(2) 按风电场群总装机容量设计外送输电容量的方法虽然可以避免弃风，但是输电线路的利用率极低。本文综合考虑电网输电收益、输电建设投资成本和输电阻塞产生的弃风损失，在适当允许弃风的情况下，不仅降低输电工程投资，而且提高了输电线路的利用率。EA