考虑风电场时空相关性的多场景优化调度

马燕峰¹,李 鑫¹,刘金山²,霍亚欣¹,陈 磊³,赵书强¹ (1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,河北 保定 071003; 2. 国网青海省电力公司,青海 西宁 810008;3. 国网衡水供电公司,河北 衡水 053000)

摘要:相邻风电场出力由于地理环境与气候条件相似而具有较强的相关性,因此构建风电相关性模型以及合理的调度模型对大规模风电并网意义重大。基于混合Copula函数和连续马尔科夫链模型构建多维时序风速相关性模型,并根据抽样产生的大量模拟场景聚类生成典型场景;构建基于场景分析的机组组合两阶段调度模型,以得到满足所有典型场景的机组启停和各场景的调度方案,并根据典型场景与模拟场景的偏差基于机会约束理论设定模型中的风电备用需求系数,以提高系统运行的可靠性与经济性。以10机2风电场系统为例进行仿真分析,结果验证了所建模型的有效性。

关键词:风速相关性;混合Copula函数;连续马尔科夫链模型;典型场景;两阶段调度模型 中图分类号:TM 614 文献标志码:A DOI:10.16081/j.epae.202001010

0 引言

近年来,化石能源日益枯竭,风能作为清洁的可再 生能源得到迅猛发展:据国家能源局统计,截至 2018年上半年,全国新增风电并网容量7.94×10°kW, 累计风电并网容量达到1.716×10°kW^[1]。风电的大 规模发展使电力系统运行的不确定性增强,对电力 系统调度提出了更高的要求,并且相邻风电场在相 似的地理环境与气候条件下具有较强的时空相关 性,因此有必要构建多风电场出力模型以及合理的 调度模型,以保证系统经济可靠运行。

目前风电场的空间相关性主要采用基于相关系数矩阵^[2-3]和基于 Copula 函数^[4-8]的相关性分析方法。 基于相关系数矩阵的建模方法只能描述相关性测度的一部分,建模不准确^[4]。文献[5-6]利用 Copula 函数构建二维风电场相关性模型并进行了 Copula 函数优选,文献[5]通过欧氏距离最小确定 Copula 函数类 优选,文献[5]通过欧氏距离最小确定 Copula 函数类 位达,文献[6]利用4个评价指标基于熵权属性识别理 论对 Copula 函数进行选优。文献[7-8]指出混合 Copula 函数比单一Copula 函数对历史数据的拟合效 果更好。但上述 Copula 函数构建的模型仅考虑了空 间相关性,而忽略了时序上的自相关特性。

风电场时序上的自相关特性一般采用概率密度 函数法^[9]和时序风速分析法^[10-12]进行分析。概率密 度函数法主要是采用特定的概率密度函数,如威布 尔分布来描述某地区风速分布,该方法简单但适应

收稿日期:2019-04-28;修回日期:2019-11-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902200);国家 电网公司科技项目(5228001700CW)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2017YFB0902200) and the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China (5228001700-CW)

性较差。时序风速分析法主要包括时间序列法^[10] (如自回归(AR)模型、自回归滑动平均(ARMA)模型)和马尔科夫链模型^[11-12],时间序列法的拟合参数 少但是拟合效果存在一定误差,马尔科夫链模型利 用转移矩阵或转移核进行风速模拟,能够较好地保 持原有的概率分布和自相关特性。

目前应对风电不确定性的优化调度方法主要有 鲁棒优化^[13-14]、基于概率密度函数^[15]和基于场景分析 的随机优化方法^[16-17]。鲁棒优化模型虽能保证可靠 性但结果趋于保守,而概率密度函数适应性较差,故 多采用基于场景分析的随机优化方法,构造的模型 多为机组组合的两阶段调度模型^[16-17]:第一阶段确 定满足各场景的机组组合方式;第二阶段确定各场 景下火电机组最优出力。但传统两阶段调度模型仅 是对典型场景进行优化,可能不满足聚类前模拟场景 的运行需求,使实际调度中出现切负荷或弃风现象。

基于以上分析,本文以混合 Copula 函数及连续 马尔科夫链(CSMC)模型构建多维时序风速相关性 模型,并生成典型风速场景。调度模型方面则改进机 组组合的两阶段调度模型:对典型场景进行优化时, 将模拟场景与典型场景风电出力偏差加入旋转备用 约束,使绝大多数模拟场景下系统经济、可靠运行。

1 风电场相关性建模

1.1 混合Copula函数

Copula 函数是基于 Sklar 定理用于刻画多元变 量相关性的连接函数^[6]。Copula 函数种类主要包括 隶属于椭圆函数族的 Gaussian-Copula 和 t-Copula 函 数,以及隶属于阿基米德函数族的 Frank-Copula、 Clayton-Copula 和 Gumbel-Copula 函数。不同类型的 Copula 函数特性不同,如:Gaussian-Copula、Frank-Copula 函数具有对称的无尾部相关性;t-Copula 函数 具有对称的尾部相关性;Gumbel-Copula函数具有上 尾相关性;Clayton-Copula函数具有下尾相关性。上 述Copula函数描述相关性特征较为单一且均不能表 现非对称的尾部相关性,因此单一Copula函数难以 精准刻画类型多样的风电场相关性特征。

由于 Frank-Copula、Gumbel-Copula 以及 Clayton-Copula 函数分别描述变量间不同方面的相关性特征,本文选用这 3 类 Copula 函数通过权重以及参数 合理配比构成混合 Copula 函数刻画多变的风速相关 性特征。混合 Copula 函数表示如下:

$$C(u_1, u_2) = \sum_{n=1}^{3} \lambda_n C_n(u_1, u_2, \theta_n)$$
(1)

其中, u_1 、 u_2 为两随机变量各自的边缘分布函数; $C_n(u_1, u_2, \theta_n)$ 为Copula函数种类; θ_n 为对应函数参

数;
$$\lambda_n \in [0,1]$$
为权重系数,且 $\sum_{n=1}^{5} \lambda_n = 1_{c}$

混合Copula函数的求取及检验步骤如下:

(1)采用非参数核密度估计法求解两风电场风速的边缘分布函数;

(2)采用最大似然估计法求解单一Copula函数 参数,并求解出其欧氏距离和最大距离;

(3)采用最大期望(EM)算法估计混合Copula函数各参数及权重^[7],并求解欧氏距离和最大距离;

(4)与单一Copula函数对比,检验混合Copula函数是否拟合度更高。

1.2 CSMC模型

同一时刻不同地区相关性采用混合Copula函数 连接,而同一地区风速各个时刻间也具有相关性,其 变化可以看作是一种随机过程。为保证风速的自相 关特性,引入CSMC模型对风速序列进行建模。

假设某地区长度为T的时间段内风速序列用 $\{V_i, t = 1, 2, \dots, T\}$ 来描述, $v_i(t=1,2,\dots,T)$ 为样本的 观测值,则风速序列1阶CSMC模型可表示为:

$$P\left(V_{t+1} \le v_{t+1} \middle| V_0 = v_0, V_1 = v_1, \cdots, V_t = v_t\right) = P\left(V_{t+1} \le v_{t+1} \middle| V_t = v_t\right) = k\left(v_{t+1} \middle| v_t\right)$$
(2)

其中, $P(\cdot|\cdot)$ 为条件概率; $k(v_{i+1}|v_i)$ 为状态转移核, 表示风速过程在t时刻状态为 v_i 时t+1时刻的状态概 率分布。该方法用条件概率表示风速的自相关特性。

该随机过程的转移密度函数为:

$$f\left(v_{i+1} \middle| v_{i}\right) = \frac{\partial^{2} H\left(v_{i+1}, v_{i}\right)}{\partial v_{i+1} \partial v_{i}} / \frac{\partial F\left(v_{i}\right)}{\partial v_{i}}$$
(3)

其中,*H*(·,·)为相邻时刻随机变量的2维联合概率分 布函数;*F*(·)为其边缘分布。

由Sklar定理知,存在一个Copula函数
$$C$$
,使得:

$$H(v_{t+1}, v_t) = C(u_{t+1}, u_t)$$
(4)

其中,
$$u_i = F(v_i), u_{i+1} = F(v_{i+1})$$
。故式(2)和式(3)分

别转化为:

$$k\left(v_{t+1} \middle| v_{t}\right) = \partial C(u_{t+1}, u_{t}) / \partial u_{t}$$
(5)

$$f(v_{t+1}|v_t) = c(u_{t+1}, u_t) f(v_{t+1})$$
(6)

其中, $c(\cdot, \cdot)$ 为Copula密度函数; $f(\cdot)$ 为 $F(\cdot)$ 的概率 密度函数。

这样状态转移核和转移密度函数便由边缘分布和Copula函数构成。

1.3 典型风速场景生成

2维以上相关性模型仅是Copula函数的构造过程不同,而风速模拟过程相同。因此,为简化Copula函数构造过程,以2座风电场为例进行说明。

(1)考虑两地区同一时刻的空间相关性,模拟产 生2个随机变量。

a. 根据 *t* 时刻原始风速数据求解出混合 Copula 函数 *C* 的各个参数及权重。

b.通过随机抽样方法产生服从上述函数*C*分布的随机变量 $\{w_{1,i}, w_{2,i}\}$ 。

(2)考虑同一地区的时序相关性,对步骤(1)产 生的每个随机变量进行模拟,将其扩充成长度为*T* 的随机变量。

a. 对第一个地区前后时刻风速构建混合 Copula 函数 $C(u_i, u_{i+1})$, 并求解其参数及权重。

b.初始时刻风速状态 $u_{1,1} = w_{1,i}$ 。

c.产生随机数z,其中z~U[0,1]。

d.则下一时刻风速状态 $u_{1,2} = C^{-1}(z|u_{1,1})_{\circ}$

e.将*u*_{1,2}作为已知状态,估计下一时刻风速状态 *u*_{1,3},依此类推,求得*u*_{1,*i*}(*t*=1,2,…,*T*)。

f.重复上述步骤,求出另一个地区的风速序列 $(u_{2,1}, u_{2,2}, \dots, u_{2,T})_{\circ}$

(3)进行场景模拟并缩减成S个典型场景。

a.重复步骤(1)、(2)M次,产生M个模拟场景。

b.每个模拟场景下2个风速序列按如下方式排列 {($u_{1,1}^{m}, u_{1,2}^{m}, \cdots, u_{1,r}^{m}, u_{2,1}^{m}, u_{2,2}^{m}, \cdots, u_{2,r}^{m}$), $m=1, 2, \cdots, M$ }, 通过模糊C均值聚类法对这M个矩阵进行场景缩 减,缩减成S个典型场景,将S个矩阵拆分为S×2个 矩阵{($u_{1,1}^{s}, u_{1,r}^{s}, \cdots, u_{1,r}^{s}$), $i=1, 2, s=1, 2, \cdots, S$ }。

 \mathbf{c} .逆变换 $v_{i,\iota}^s = F^{-1}(u_{i,\iota}^s)$,得到典型风速场景。

1.4 风速-风电功率转化

风力发电功率与风速之间的转化关系[8]为:

$$P_{w} = \begin{cases} 0 & v \leq v_{wi}, v \geq v_{wo} \\ \frac{v^{g} - v_{wi}^{g}}{v_{r}^{g} - v_{wi}^{g}} P_{wr} & v_{wi} \leq v \leq v_{r} \\ P_{wr} & v_{r} \leq v < v_{wo} \end{cases}$$
(7)

其中,*v*_{wi}、*v*_{wo}、*v*_r分别为切入风速、切出风速以及额定风速;*P*_{wr}为风电机组额定出力;*g*为风速-功率系数,理想值为3。

2 机组组合的两阶段调度模型

每类典型风速场景对应一类典型风电场出力情 况,风电出力不同则优化结果也不同。为尽可能寻 求适用于各种可能情况的优化方案,本文采用机组 组合的两阶段调度模型:第一阶段为所有场景相同 的决策,即确定机组启停;第二阶段决策是针对具体 典型场景,特定场景采用特定调度方案。考虑到风 电场典型场景与模拟场景存在偏差且不同场景不同 时刻下偏差大小不同,优化调度时若不考虑两者出 力偏差,可能使优化结果不满足模拟场景调度需求。 若采用固定备用系数处理偏差[16],备用系数设定较 小会使系统发生切负荷而不能保证可靠性,设定较 大会增加旋转备用成本而不满足经济性要求,故本 文根据两者偏差通过机会约束理论设定随场景、时 间变化的备用系数,保证在每个场景各时刻下都能满 足绝大多数模拟场景需求,使系统经济、可靠运行。

2.1 目标函数

本文调度成本包括火电机组燃煤成本、旋转备 用成本及启停成本。由式(8)求解满足各场景要求的 机组启停 $\alpha_{i,i}(\alpha_{i,j})$ 为0-1变量,1表示运行,0表示停 运),再针对具体场景s优化调度成本F_s,如式(9)所示。

$$\min F = \sum_{s=1}^{S} \pi_{i}^{s} \sum_{t=1}^{J} \sum_{i=1}^{N_{c}} \left\{ \left[a_{i} (P_{i,t}^{s})^{2} + b_{i} P_{i,t}^{s} + d_{i} \right] + \left(\kappa_{i} U_{i,t}^{s} + \mu_{i} D_{i,t}^{s} \right) \right\} + \sum_{t=1}^{J} \sum_{i=1}^{N_{c}} \alpha_{i,t} (1 - \alpha_{i,t-1}) S_{i,t}^{q}$$
(8)

$$\min F_{s} = \sum_{t=1}^{J} \sum_{i=1}^{N_{c}} \left\{ \left[a_{i} (P_{i,t}^{s})^{2} + b_{i} P_{i,t}^{s} + d_{i} \right] + \left(\kappa_{i} U_{i,t}^{s} + \mu_{i} D_{i,t}^{s} \right) \right\} + \sum_{t=1}^{J} \sum_{i=1}^{N_{c}} \alpha_{i,t} (1 - \alpha_{i,t-1}) S_{i,t}^{q}$$
(9)

其中, π ;为各典型场景的概率;J为调度时段数; N_{c} 为火电机组数; P_{i} 为场景s下机组i在t时刻的发电 功率; a_i , b_i , d_i 为机组i的发电成本系数; $U_{i,i}^s$, $D_{i,i}^s$ 分别 为场景s下机组i在t时刻的正、负旋转备用容量; κ_i 、 μ_i 分别为正、负旋转备用的报价系数; S_{i}^{g} ,为t时刻机 组i的启动成本。

2.2 约束条件

(1)功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{N_{\rm c}} P_{i,t}^{s} + \sum_{w=1}^{N_{w}} P_{w,t}^{s} = P_{\rm L,t}$$
(10)

其中, N_w 为风电场数; P_w^s ,为场景s下风电场w在t时 刻的出力;P_{Lt}为t时刻系统总负荷。

(2)机组爬坡约束:

$$\begin{cases} P_{i,t}^{s} - P_{i,t-1}^{s} \leq \Delta P_{i}^{u} \Delta J \\ P_{i,t-1}^{s} - P_{i,t}^{s} \leq \Delta P_{i}^{d} \Delta J \end{cases}$$
(11)

其中, ΔJ 为调度时长,本文取1h; ΔP_{μ}^{u} 、 ΔP_{μ}^{d} 分别为机 组i的上、下爬坡速率。

(3)机组出力上下限约束:
$$\alpha_{i,t}P_{imin} \leq P_{i,t}^{s} \leq \alpha_{i,t}P_{imax}$$
 (12)

其中,P_{imax}、P_{imin}分别为机组i的出力上、下限。 (4)旋转备用约束:

$$\begin{cases} U_{i,t}^{s} \leq \alpha_{i,t} \min \left(P_{i\max} - P_{i,t}^{s}, \Delta P_{i}^{u} \Delta J \right) \\ D_{i,t}^{s} \leq \alpha_{i,t} \min \left(P_{i,t}^{s} - P_{i}^{\min}, \Delta P_{i}^{d} \Delta J \right) \\ R_{t}^{u,s} = \sum_{i=1}^{N_{c}} U_{i,t}^{s} = L_{u} P_{L,t} + \sum_{w=1}^{N_{w}} w_{ut}^{w} P_{w,t}^{s} \\ R_{t}^{d,s} = \sum_{i=1}^{N_{c}} D_{i,t}^{s} = L_{d} P_{L,t} + \sum_{w=1}^{N_{w}} w_{dt}^{s} P_{w,t}^{s} \end{cases}$$
(13)

其中,R^{u,s}、R^{d,s}分别为场景s下正、负旋转备用总量; L_u、L_d分别为负荷波动引起的正、负备用需求系数, 一般取5%;w^s_u,w^s_d分别为场景s下t时刻风电波动产 生的正、负备用需求系数。

场景s下典型风电出力波动实际就是与模拟场 景下风电出力的偏差值,故w^s_u、w^s_d可表示为:

$$\begin{cases}
P_{r}\left\{w_{ut}^{s} - \frac{P_{w,t}^{s} - P_{w,t}^{m(s)}}{P_{w,t}^{s}} \ge 0\right\} \ge \gamma_{1} \quad P_{w,t}^{s} \ge P_{w,t}^{m(s)} \\
P_{r}\left\{w_{dt}^{s} - \frac{P_{w,t}^{m(s)} - P_{w,t}^{s}}{P_{w,t}^{s}} \ge 0\right\} \ge \gamma_{2} \quad P_{w,t}^{s} \le P_{w,t}^{m(s)}
\end{cases}$$
(14)

其中,P_r(•)为随机事件"•"发生的概率;P^{m(s)}为模拟 场景m聚类后隶属于场景s的风电场w的风电功率; γ_1,γ_2 为其置信水平。

(5)机组最小开机、停机时间约束:

$$\begin{cases} (\alpha_{i,t} - \alpha_{i,t-1}) + (\alpha_{i,t+\tau-1} - \alpha_{i,t+\tau}) \leq 1 \\ \forall \tau \in \{1, 2, \cdots, T_i^u - 1\} \\ (\alpha_{i,t-1} - \alpha_{i,t}) + (\alpha_{i,t+\tau} - \alpha_{i,t+\tau-1}) \leq 1 \\ \forall \tau \in \{1, 2, \cdots, T_i^d - 1\} \end{cases}$$
(15)

其中,T^u、T^d分别为机组i的最小开机和停机时间。 2.3 模型求解

模型的计算过程见附录中图A1,其分为多维时 序风速相关性建模、典型风电出力场景构建以及机 组组合的两阶段调度求解3个部分。前2个部分计 算流程已在第1节中详细介绍,第3个部分将各典型 场景下风电出力值、火电机组参数和负荷原始数据 等代入调度模型,利用MATLAB和Yalmip工具箱联 合求解,得到各典型场景下的调度结果。

3 相关性模型验证

3.1 混合Copula函数验证

选用青海省某地区两相邻风电场风速信息构建 相关性模型。以两风电场第1时刻为例进行求解, 混合Copula函数建模参数和权重如表1所示。

单一Copula建模参数以及结果对比见表2,表 中 θ 为单一Copula函数对原始数据的拟合参数。由

表1 混合Copula函数相关参数及权重

Table 1	Related	paramet	ers and	weights	of
	mixed	Copula	function	1	

	1	
混合 Copula 函数构成	θ_{n}	λ_n
Frank-Copula	5.874	0.0063
Gumbel-Copula	2.493	0.4013
Clayton-Copula	2.932	0.5924

表2可知,混合 Copula 函数的欧氏距离和最大距离 分别为0.115和0.0140,而采用单一Copula 函数的欧 氏距离和最大距离最小值分别为t-Copula 函数的 0.252和Frank-Copula 函数的0.0308。混合 Copula 函数所求得检验值远小于任何单一Copula 函数的检 验值,故采用混合Copula 函数模拟更为精准。

表2 Copula函数参数及结果对比

Table 2 Comparison of parameters and

results among Copula functions

Copula函数	θ	欧氏距离	最大距离
Gaussian-Copula	0.675	0.404	0.0548
t-Copula	0.780	0.252	0.0332
Frank-Copula	7.214	0.298	0.0308
Gumbel-Copula	2.152	0.370	0.0472
Clayton-Copula	2.158	0.299	0.0318
混合Copula		0.115	0.0140

图1为根据历史数据绘制的频率分布直方图 (图中 u₁、u₂分别对应风电场1和2),可以看出两地 区风速下尾相关性高于上尾相关性,即不对称的尾 部相关性,单一 Copula 函数相关性特征均不满足上 述特征,拟合误差较大。而若采用混合 Copula 函数, 权重系数为0.5924的 Clayton-Copula 保证其下尾相 关性,权重系数为0.4013的 Gumbel-Copula 保证其 上尾相关性,结果见图2。通过图1与图2以及单一 Copula 函数密度函数图(见附录中图 A2)对比,可见 混合 Copula 函数拟合效果最好。

3.2 自相关特性仿真验证

根据原始风速与模拟风速序列分别求解两地区 自相关系数,结果见图3。可见,该模型产生的模拟 风速在一定延时范围内可以很好地保持原始风速的 自相关特性,即时间层面上其短期相关性能够得到 保证。







图2 混合Copula函数拟合的密度函数





图 3 模拟风速与原始风速自相关特性 Fig.3 Autocorrelation between simulated wind speed and original wind speed

3.3 风速典型场景生成

根据产生的1000个模拟场景通过模糊C均值 聚类法将风速较为一致的场景划分为一类,共聚类 出12个典型场景,如附录中图A3所示。对于同一 场景下的2座风电场,其风速走势较为一致,风速值 存在明显的相关性;对于不同场景下的同一风电场, 其风速走势均不相同,且各个场景下的场景概率较 为均匀,可见聚类效果较好。

4 算例分析

以10机2风电场的风火联合系统为例对场景 调度模型进行仿真分析,火电机组参数主要来自文 献[18-19],并进行修订整合,见附录中表A1。负荷 参数见图4。风电场装机容量均为200 MW,其切入 风速、额定风速和切出风速分别为3.5、11、22.2 m/s。 利用 MATLAB 和 Yalmip 工具箱联合求解,求解器选 用 Gurobi 8.0.1。

4.1 仿真结果

4.1.1 机组启停

机组启停结果为前9台机组24h处于工作状态, 机组10启停状态见图5,其在01:00-09:00、23:00-



Fig.5 Startup and shutdown state of Unit 10

24:00处于停运状态,在其余时段处于工作状态。这 是由于机组10单位发电成本较高,调度优先启停高 耗额的机组。且在01:00—09:00、23:00—24:00负荷 长期处于低谷,其长期性能满足机组10开、停机时间 约束,在低谷时停运机组10还能使前9台火电机组 发电总容量2650 MW大于该时段负荷需求,见图4。

4.1.2 系统出力

以场景1为例分析各机组出力。火电机组及两 风电场的各时段出力分别见附录中图A4和图A5, 对比图4可知,该系统中火电机组为负荷提供主要 的功率,其出力趋势跟随大部分负荷需求变化;虽然 风电出力具有不确定性,但是风电输出功率的增加 使得高耗额的火电机组减小出力甚至退出运行,两 者相互协调,使得经济成本最优。

4.2 空间相关性对优化结果的影响

为研究空间相关性对优化结果的影响,本文采 用2种方法进行求解:方法1,按1.3节所述步骤生成 具有时空相关性的1000个模拟场景,并缩减出12 个典型场景,代入调度模型进行求解;方法2,不考 虑风电场空间相关性,即将相关系数设定为0,两风 电场的联合分布函数为*C*(*u*₁,*u*₂)=*u*₁*u*₂,时序相关性 以及典型场景生成步骤同方法1,并代入模型求解。

不同场景下风电出力不同致使调度结果不同,2 种方法的调度结果见附录中表A2。但考虑空间相 关性和不考虑空间相关性经过聚类生成的典型场景 无法一一对应,故本文采取12个场景下调度的极值 成本及均值成本来研究相关性对优化结果影响,结 果见表3。

从表3可见,考虑空间相关性时12个场景极大 值成本比不考虑空间相关性时的要小,极小值成本 比不考虑空间相关性时的要大,而两者均值成本较 接近,这说明考虑空间相关性比不考虑空间相关性 的各场景成本波动要大。这是因为考虑空间相关性

表3 考虑空间相关性和不考虑空间相关性结果对比

Table 3 Results comparison between with and without

considering spatial correlation							
条件	极大值成本	极小值成本	均值成本				
考虑空间相关性	139.20	157.65	149.01				
不考虑空间相关性	143.80	154.73	148.79				

时两风电场风电走势比不考虑空间相关性时更趋一致,即若风电场1风电出力处于低谷,考虑空间相关 性时风电场2的风电出力处于低谷的概率更大,峰 值亦是如此,这使得考虑空间相关性求解出的12个 场景下两风电场风电总出力比不考虑空间相关性的 波动要大,风电出力波动增大使不同场景的调度成 本波动增大。另一方面,方法2虽然未考虑风电场 空间相关性,但2个风电场时序上的相依特性没有 改变,即模拟出两风电场的风速序列与方法1模拟 的时间序列接近,仅仅是两风电场模拟的时序序列 不能对应,聚类出的典型场景不能一一对应,但风电 出力均值相近,这使12个场景下均值成本较接近。

4.3 备用需求系数可调对优化结果的影响

4.3.1 备用需求系数固定与否对比分析

以场景1下的风电场1为例,其模拟场景与典型 场景下的风电功率见附录中图A6,利用典型场景与 模拟场景的风电功率偏差,根据式(14)(γ₁、γ₂均取 95%)确定风电引起的备用容量及其备用需求系数, 结果见图6。从图中可见,不同时刻的备用需求系 数不同:其中09:00—13:00备用需求系数较大,原因 在于该时段风电功率小,虽然备用容量与其他时刻 相近,但是备用容量与此时典型场景风电出力的比 值却大幅增加,即备用需求系数大幅增加;而19:00 风电功率为额定功率,风电功率不再向上波动,故无 需给火电机组留取负备用容量,此时负备用需求系



Fig 6 Deserve requirement equeed by deviation



数为0。综上,风电波动引起的备用需求系数应该 根据具体场景的具体时刻进行设定,设为固定值不 能满足系统的经济、可靠运行要求。

4.3.2 不同置信水平对优化结果的影响

置信水平表示系统能接受的风险水平,置信水 平γ₁、γ₂设置得越大,备用需求系数和备用容量就越 大,此时系统的可靠性高但备用成本也随之增大。 为进一步研究不同置信水平对优化结果的影响,本 文将系统的供电可靠性转化为切负荷成本:在典型 场景s中对不满足该置信水平的h个模拟场景进行 切负荷处理并增加切负荷成本,并将成本均摊到该 典型场景s下全部H个模拟场景,切负荷均值成本为:

$$S_{\rm c} = \sum_{i=1}^{n} M_{\rm c} P_{{\rm c},i} / H$$
 (16)

其中,S_e为切负荷均值成本;P_{e,i}为第*i*个模拟场景的 电量缺额;M_e为单位电量缺电成本,其值设为平均 单位发电成本的10倍。

以场景1为例分别求解出该场景下置信水平为 85%、90%、92.5%、95%、97.5%、100%时的正、负旋 转备用成本及切负荷成本,结果见图7。图中,正、 负旋转备用成本随置信水平增大而增加,同一置信 水平下正旋转备用成本大于负旋转备用成本,且增 长近似为一条直线。这是因为备用容量随着置信水 平的增大而增大,正、负旋转备用成本也随之增大, 且如图6所示,一天调度火电总负备用容量小于总 正备用容量,故正备用成本较高。而切负荷均值成本 却随着置信水平增大而减小,这是因为置信水平越 大,发生切负荷的概率越低,使得切负荷均值成本也 随之减少。旋转备用和切负荷均值成本两者总成本 则是随着置信水平的增大先减小而后增大,置信水 平设置在92.5%~97.5%间总成本较小,故在该单位 电量缺电成本下设置置信区间在该范围内较合适。



① 正旋转备用成本,② 负旋转备用成本
 ③ 切负荷成本,④ 切负荷+旋转备用成本
 ⑤ 正+负旋转备用成本

图7 不同置信水平下切负荷成本与旋转备用成本

Fig.7 Load shedding cost and spinning reserve cost for different confidence levels

5 结论

本文针对相邻风电场相关性问题,构建了时空 相关性模型以及基于场景分析的调度模型,经过计 算和分析所得结论如下。 (1)相比单一Copula函数,采用混合Copula函数 欧氏距离和K-S检验统计量更小,拟合效果更好。

(2)利用混合 Copula 函数和 CSMC 模型构建的 多维时序相关性模型能较好保持原始风速序列时空 相关性,可用于考虑风电场时空相关性的风速模拟。

(3)所建调度模型在对典型场景优化的同时,设 定随场景、时间变化的备用需求系数能兼顾到绝大 多数模拟场景的运行需求。本文分析旋转备用成本 和切负荷均值成本随置信水平的变化规律,给出合理 的置信区间兼顾系统运行的经济性和供电可靠性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 2018年上半年风电并网运行情况[EB / OL].
 (2018-07-30) [2019-01-02]. http://www.nea.gov.cn / 2018-07 / 30 / c_137357453.htm.
- [2]方斯顿,程浩忠,徐国栋,等.基于Nataf变换和准蒙特卡洛模拟的随机潮流方法[J].电力自动化设备,2015,35(8):38-44.
 FANG Sidun,CHENG Haozhong,XU Guodong, et al. Probabilistic load flow method based on Nataf transformation and quasi Monte Carlo simulation[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(8):38-44.
- [3] 李珂,邰能灵,张沈习,等.考虑相关性的分布式电源多目标规 划方法[J].电力系统自动化,2017,41(9):51-57,199.
 LI Ke, TAI Nengling, ZHANG Shenxi, et al. Multi-objective planning method of distributed generators considering correlations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017,41(9): 51-57,199.
- [4] 吴巍,汪可友,李国杰,等. 基于 Pair Copula 的多维风电功率 相关性分析及建模[J]. 电力系统自动化,2015,39(16):37-42.
 WU Wei,WANG Keyou,LI Guojie, et al. Correlation analysis and modeling of multiple wind power based on Pair Copula [J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(16):37-42.
- [5] 吴耀武,张联邦,李海英,等.考虑多风电场出力相关性的风电容量可信度评估方法[J].电力自动化设备,2015,35(11): 8-12.

WU Yaowu, ZHANG Lianbang, LI Haiying, et al. Wind-power capacity credibility assessment considering power output correlation of multiple wind farms [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11):8-12.

[6]谢敏,熊靖,刘明波,等.基于Copula的多风电场出力相关性建 模及其在电网经济调度中的应用[J].电网技术,2016,40(4): 1100-1106.

XIE Min, XIONG Jing, LIU Mingbo, et al. Modeling of multi wind farm output correlation based on Copula and its application in power system economic dispatch[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1100-1106.

- [7] 付一木.考虑随机风电接入的动态经济调度问题研究[D].广州:华南理工大学,2016.
 FU Yimu. Study on dynamic economic dispatch considering stochastic wind power integration[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2016.
- [8] 潘雄,王莉莉,徐玉琴,等. 基于混合 Copula 函数的风电场出力 建模方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(14):17-22.
 PAN Xiong, WANG Lili, XU Yuqin, et al. A wind farm power modeling method based on mixed Copula[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(14):17-22.
- [9] 孙惠娟,彭春华,易洪京.大规模风电接入电网多目标随机优 化调度[J].电力自动化设备,2012,32(5):123-128.

 $\label{eq:SUN-Huijuan,PENG-Chunhua,YI-Hongjing. Multi-objective stochastic optimal dispatch of power system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):123-128.$

- [10] BIZRAH A F, ALMUHAINI M M. Load reliability analysis using ARMA wind speed modeling[C]//2015 IEEE 8th GCC Conference & Exhibition. New York, USA: IEEE, 2015: 1-6.
- [11] 史可琴,王方雨,梁琛,等. 基于随机过程自相关性的风速预测 模型分析[J]. 电网技术,2017,41(2):529-535.
 SHI Keqin, WANG Fangyu, LIANG Chen, et al. A new wind speed prediction model based on random process considering autocorrelation[J]. Power System Technology,2017,41(2):529-535.
- [12] 孙运涛,李玉敦,张婉婕,等. 基于条件相依特性的风速仿真模型及其应用[J]. 太阳能学报,2017,38(11):3131-3137.
 SUN Yuntao,LI Yudun,ZHANG Wanjie, et al. A wind speed simulation model based on condition dependence and its application[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2017,38(11):3131-3137.
- [13] 吕智林,汤泽琦.基于灰熵关联择优的含不确定性预算调节策略的微电网鲁棒调度[J].电力自动化设备,2017,37(9):38-45.
 LÜ Zhilin, TANG Zeqi. Microgrid robust dispatch with uncertainty budget adjustment strategy based on grey entropy relation optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(9):38-45.
- [14] 张刘冬,袁宇波,孙大雁,等. 基于两阶段鲁棒区间优化的风储 联合运行调度模型[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):59-66,93.

ZHANG Liudong, YUAN Yubo, SUN Dayan, et al. Joint operation model of wind-storage system based on two-stage robust interval optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12):59-66,93.

- [15] 周玮,孙辉,顾宏,等. 计及风险备用约束的含风电场电力系统 动态经济调度[J]. 中国电机工程学报,2012,32(1):47-55,19.
 ZHOU Wei,SUN Hui,GU Hong,et al. Dynamic economic dispatch of wind integrated power systems based on risk reserve constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 47-55,19.
- [16] 刘小聪,王蓓蓓,李扬,等. 基于实时电价的大规模风电消纳机

组组合和经济调度模型[J]. 电网技术,2014,38(11):2955-2963.

LIU Xiaocong, WANG Beibei, LI Yang, et al. Unit commitment model and economic dispatch model based on real time pricing for large-scale wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 2955-2963.

- [17] 徐箭,洪敏,孙元章,等. 基于经验Copula函数的多风电场出力 动态场景生成方法及其在机组组合中的应用[J]. 电力自动化 设备,2017,37(8):81-89.
 XU Jian, HONG Min, SUN Yuanzhang, et al. Dynamic scenario generation based on empirical Copula function for outputs of multiple wind farms and its application in unit commitment [J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(8):81-89.
- [18] 雷宇,杨明,韩学山. 基于场景分析的含风电系统机组组合的 两阶段随机优化[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(23): 58-67.

LEI Yu, YANG Ming, HAN Xueshan. A two-stage stochastic optimization of unit commitment considering wind power based on scenario analysis [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23):58-67.

[19] 金晶亮. 计及风力发电的电力系统环境经济调度建模分析
 [D]. 南京:南京航空航天大学,2015.
 JIN Jingliang. Modeling analysis of economic emission dispatch with wind power[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2015.

作者简介:



马燕峰(1978—),女,河北迁西人,副教 授,博士,主要研究方向为电力系统分析、运 行与控制(E-mail:ma_yanfeng01@163.com); 李 鑫(1994—),男,河北邯郸人,硕 士研究生,研究方向为新能源电力系统调度 (E-mail:18222964281@163.com);

霍亚欣(1995—),男,河北邢台人,硕 士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制 (**E-mail**:1576065764@qq.com)。

(编辑 王锦秀)

Multi-scenario optimal dispatch considering temporal-spatial correlation of wind farms MA Yanfeng¹, LI Xin¹, LIU Jinshan², HUO Yaxin¹, CHEN Lei³, ZHAO Shuqiang¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electric Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China;

3. State Grid Hengshui Power Supply Company, Hengshui 053000, China)

Abstract: The output of adjacent wind farms has strong correlation because of the similarity of geographical environment and climatic conditions. Therefore, it is of great significance to construct wind power correlation model and reasonable dispatching model for large-scale wind power integration. A multivariate time-series wind speed correlation model is built based on the mixed Copula function and the continuous state Markov chain model, and a typical scenario is generated by clustering a large number of simulated scenarios generated by sampling. A two-stage unit commitment dispatching model based on scenario analysis is built to obtain the unit start-stop scheme satisfying all typical scenarios and the dispatching scheme of each scenario, and according to the deviation between the typical scenario and simulation scenario, the reserve demand coefficient of wind power in the model is set based on chance constraint theory to improve the reliability and economy of system operation. A 10-generator 2-wind farm system is taken as an example for simulation and analysis, and the results verify the effectiveness of the proposed model.

Key words: wind speed correlation; mixed Copula function; continuous state Markov chain model; typical scenario; two-stage dispatching model 附录:











注:场景 1—6 的概率分别为 0.078、0.080、0.081、0.10、0.07、0.087,场景 7—12 的概率分别为 0.082、0.091、0.08、0.075、0.086、0.09。

机组	P _{min} / MW	P _{max} / MW	启动 时间/h	停运时 间/h	上爬坡/ (MW•h ⁻¹)	下爬坡/ (MW•h ⁻¹)	a/ (元•M₩ ⁻²)	b/ (元•MW ⁻¹)	d/元	启动成 本/元	正旋转备用 成本/ (元•MW ⁻¹)	负旋转备用 成本/ (元•MW ⁻¹)
1	450	800	8	8	200	200	0.000 5	23.24	1000	3000	17.7	15.4
2	20	110	6	4	27.5	27.5	0.002 5	22.78	250	400	14.1	13.1
3	30	100	6	4	25	25	0.002 5	23.25	250	400	13.9	11.8
4	42	140	6	4	42	42	0.002 3	23.72	280	500	16.7	12.5
5	40	140	6	4	40	40	0.002 3	22.87	300	500	18.1	15.3
6	120	300	6	6	90	90	0.002 1	22.7	700	1000	13.53	11.2
7	45	220	6	6	55	55	0.002 3	22.44	400	750	14.7	13.6
8	50	260	6	6	55	55	0.002 1	22.34	400	750	16.4	12.3
9	264	600	8	8	110	110	0.001 2	21.98	950	2000	15.4	14.5
10	240	400	6	6	55	55	0.002 4	23.44	400	1000	17.8	15.1

表 A1 火电机组参数

Table A1 Parameters of thermal power units



图 A4 火电功率

Fig. A4 Thermal unit power



表 A2 考虑空间相关性与否典型场景调度结果对比 Table A2 Typical scenario dispatch result comparison between with and without considering spatial correlation

	••											万元
友准						ì	周度成本					
余件	场景1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 5	场景 6	场景 7	场景 8	场景 9	场景 10	场景 11	场景 12
考虑空间相 关性	149.67	147.23	157.65	152.56	147.02	139.2	153.4	153.63	143.99	149.09	142.37	152.34
不考虑空间 相关性	146.8	151.85	154.73	150	143.8	145.5	154.34	148.77	146.76	145.56	146.54	150.88



Fig. A10 Wind power in simulated scenario and typical scenario