

# 分位数拟合的点估计法随机潮流在输电网规划中的应用

张衡<sup>1</sup>,程浩忠<sup>1</sup>,曾平良<sup>2</sup>,张建平<sup>3</sup>,陆建忠<sup>3</sup>

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室,上海 200240;  
2. 中国电力科学研究院,北京 100192;3. 国家电网公司华东分部,上海 200002)

**摘要:**为了更全面地描述输电网规划中面临的负荷波动、风电出力这些不确定因素,以点估计法随机潮流为基础、年综合费用最小为目标函数,并计及网络损耗,建立输电网优化规划模型。引入多项式正态变换技术对非正态变量相关性进行处理。采用基于最小二乘的分位数拟合法求取多项式正态变换的系数,有效地避免了积分运算。以总体样本均值和样本方差均值为指标,量化相关性对风电出力的影响。采用改进的粒子群优化算法对修改的 IEEE-RTS 24 节点系统进行算例分析,结果表明,随着相关性的增强,负荷、风速出现极值的概率增加,电网需要投建更多线路以应对系统中的不确定因素。

**关键词:**输电网规划;点估计法;相关性;随机最优潮流;粒子群优化算法

**中图分类号:**TM 73

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.007

## 0 引言

风电的集中式接入及其大规模、远距离传输,给输电网规划带来了新的挑战。考虑到风速具有间歇性、波动性的特点,风电场出力将在 0 到额定值之间波动,这会使得传输线路上的潮流和节点电压产生剧烈的波动<sup>[1]</sup>。此外,风电场风速之间存在时间和空间的相关性<sup>[2-3]</sup>。风电带来的不确定性有别于传统的不确定因素,其对系统安全性的影响将会更加显著。传统确定性规划对不确定因素进行了弱化,所得规划方案对未来环境变化的适应能力较差<sup>[4-5]</sup>。因此,有必要加强对不确定因素的建模,突出不确定因素对输电网规划模型的影响。

针对输电网规划中不确定因素的处理,国内外有很多学者进行了研究。文献[6]根据风电与负荷全年的时序数据,利用多场景技术,在各场景下通过发电再调度来平衡风电带来的波动;文献[7]利用蒙特卡洛模拟法得到风电场的出力,通过多场景分析对电网规划中涉及的不确定因素进行处理分析,进而得到输电网的网架结构。多场景处理不确定因素存在两方面的问题:一方面场景的划分与选取难以确定,易受到实验者主观性的影响;另一方面,有限的场景数难以全面反映不确定因素的随机特性。文献[8]考虑了电网规划中线路造价、新增电源装机容量以及负荷增长的不确定性,建立了基于机会约束的输电网双层规划模型,采用蒙特卡洛模拟法结合遗传算法对不确定因素进行采样和计算;文献

[9]针对负荷和风电出力的不确定性,采用机会约束的方法进行处理。机会约束往往需要大规模模拟随机变量的取值,再进行后校验,其求解精度与采样规模相关,计算负担较大。

为了平衡求解精度与时间,本文将随机潮流引入输电网规划中,建立了基于点估计法随机潮流的输电网规划模型,并基于直流潮流的假设条件推导了网损的计算表达式。引入多项式正态变换技术处理随机变量间的相关性。通过分位数拟合法计算变换系数,避免了积分运算。最后,利用改进的多种群粒子群优化 MPSO (Multi-swarm Particle Swarm Optimization) 算法对 IEEE-RTS 24 节点系统进行求解以验证本文所提模型的合理性及算法的有效性。

## 1 基于分位数拟合的点估计法随机潮流

### 1.1 基于分位数拟合的多项式正态变换

根据多项式正态变换原理,服从任意分布的随机变量  $X$  可以由标准正态分布变量  $S$  的多阶多项式表示为:

$$X = \lambda_0 + \lambda_1 S + \lambda_2 S^2 + \dots + \lambda_\gamma S^\gamma \quad (1)$$

其中,  $\lambda_i (i=0, 1, \dots, \gamma)$  为变换系数,  $\gamma$  通常取值为 3 或 5, 则上式相应称为 3 阶或 5 阶多项式正态变换。

文献[10]采用概率加权矩 (PWM) 求取变换系数。该方法需要对目标随机变量  $X$  的边际概率分布函数进行积分,计算繁琐。行矩匹配法的计算量随着阶数的增加而快速增长,且需要对非线性方程组进行求解。分位数拟合法只需通过对目标随机变量的边际概率分布和正态随机变量的边际分布进行采样,再对采样点进行最小二乘拟合即可得到变换系数<sup>[11]</sup>。

对于式(1),取  $X$  的累计分布函数为  $F(X)$ ,  $S$  服从标准正态分布,其累计分布函数为  $\Phi(S)$ 。设  $p$

收稿日期:2017-10-19;修回日期:2018-07-29

基金项目:国家重点基础研究项目(2016YFB0900102);国家自然科学基金重点项目(51337005)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900102) and the Key Program of the National Natural Science Foundation of China(51337005)

( $0 \leq p \leq 1$ )对应的分位数分别为  $X_p$  和  $S_p$ , 则:

$$X_p = F^{-1}(p) \quad (2)$$

$$S_p = \Phi^{-1}(p) \quad (3)$$

则对任意分位数  $X_p$  可由下式进行拟合:

$$X_p = \lambda_0 + \lambda_1 S_p + \lambda_2 S_p^2 + \dots + \lambda_n S_p^n \quad (4)$$

利用分位数拟合法求取多项式正态变化中多项式系数的方法如下<sup>[11]</sup>:

a. 分别对随机变量  $S$  和  $X$  在区间  $[10^{-4}, 0.01]$ 、 $[0.01, 0.99]$ 、 $[0.99, 1-10^{-4}]$  均匀采样, 采样点个数分别为  $N_1, N_2, N_3$ , 即所有随机变量在 3 个区间上总采样次数为  $N = N_1 + N_2 + N_3$ ;

b. 利用式(2)和式(3)计算对应的分位点, 可得到  $N$  对数据  $(S_{pi}, X_{pi}) (i=1, 2, \dots, N)$ ;

c. 利用基于最小二乘的多项式拟合法对得到的  $N$  对数据进行拟合, 可得到式(1)中的系数  $\lambda_i$ 。

## 1.2 点估计法随机潮流

点估计法属于随机潮流计算中的近似法, 与以蒙特卡洛为代表的模拟法相比, 虽然都不需要对确定性潮流程序做出改动, 但点估计法在运算耗时方面大幅降低, 其已经在电力系统规划、机组组合等方面得到了应用<sup>[12-13]</sup>。点估计法可以得到输出变量的各阶矩, 进而可以得到所需的期望值、方差等信息。常用的点估计法有两点估计法和三点估计法, 采样点越多, 计算结果的精度越高。对于具有  $k$  个随机变量的问题, 理论上三点估计法需要进行  $3k$  次确定性潮流计算, 两点估计法需要进行  $2k$  次。但在三点估计法中会将均值作为一个采样值, 因此会出现  $k$  次采样值都是均值的情况, 此时只需要进行一次确定性潮流计算即可, 故三点估计法的实际运算量只有  $2k+1$  次<sup>[14-16]</sup>。所以本文使用三点估计法进行概率潮流计算。

设由  $k$  个随机变量组成向量  $\mathbf{Z} = (z_1, z_2, \dots, z_k)$ , 第  $i$  个随机变量对应的期望值为  $\mu_i$ , 标准差为  $\delta_i$ 。则三点估计法的采样值可以表示为:

$$z_{i,m} = \mu_i + \xi_{i,m} \delta_i \quad i=1, 2, \dots, k; m=1, 2, 3 \quad (5)$$

其中,  $z_{i,m}$  为第  $i$  个随机变量第  $m$  个采样值;  $\xi_{i,m}$  为对应采样点的权重, 当以均值表示第 3 个采样点时,  $\xi_{i,3} = 0 (i=1, 2, \dots, k)$ , 另外两采样点的权重可表示为式(6)所示。

$$\xi_{i,m} = \frac{\gamma_{i,3}}{2} \pm \sqrt{\gamma_{i,4} - \frac{3}{4}\gamma_{i,3}^2} \quad m=1, 2 \quad (6)$$

其中,  $\gamma_{i,3}$  和  $\gamma_{i,4}$  分别为随机变量  $z_i$  的偏度系数和峰度系数。

当随机变量  $z_i$  取某一个采样值时, 其余  $k-1$  个随机变量取均值。所有随机变量采样完成后, 可以得到  $3k \times k$  阶的采样矩阵, 矩阵的每一行代表每一次

潮流计算时所需输入的随机变量值。由于均值是每个随机变量的 3 个采样值之一, 所以有  $k$  行采样值完全相同, 故实际采样矩阵大小为  $(2k+1) \times k$  阶。

以  $R(i, m)$  表示随机变量  $z_i$  取第  $m$  个采样值时计算得到的线路潮流结果, 可得线路潮流各阶矩:

$$M(R^j) = \sum_{i=1}^k \sum_{m=1}^3 \omega_{i,m} (R(i, m))^j \quad (7)$$

其中,  $\omega_{i,m}$  为  $z_i$  取第  $m$  个采样值时输出线路潮流结果对应的权重系数, 可表示为式(8)~(10)所示。

$$\omega_{i,1} = \frac{1}{\xi_{i,1}^2 - \xi_{i,1}\xi_{i,2}} \quad (8)$$

$$\omega_{i,2} = \frac{1}{\xi_{i,2}^2 - \xi_{i,1}\xi_{i,2}} \quad (9)$$

$$\omega_{i,3} = \frac{1}{k} - \frac{1}{\gamma_{i,4} - \gamma_{i,3}^2} \quad (10)$$

## 2 输电网扩展规划模型及求解方法

### 2.1 输电网扩展规划模型

本文以年综合费用最小为目标函数, 给出了直流潮流中有功损耗的计算表达式, 以三点估计法随机最优潮流计算网损及发电机运行费用期望值, 建立如下的输电网扩展规划模型:

$$\min \alpha \sum_{l \in A} C_l I_l + \beta \sum_{l \in A} E(p_{l(\text{loss})}) + \tau \sum_{j \in N_g} E(p_{j(g)}) \quad (11)$$

其中,  $\alpha$  为资金回收系数, 其数学形式表达为  $\alpha = M(1+M)^\varepsilon / [(1+M)^\varepsilon - 1]$ ,  $M$  为贴现率,  $\varepsilon$  为工程经济使用年限;  $C_l$  为线路  $l$  的造价;  $I_l$  为支路  $l$  可扩展回路的数量;  $A$  为新建线路集;  $\beta$  为年网损费用系数;  $N_g$  为所有常规发电机集合;  $E(p_{l(\text{loss})})$  为线路  $l$  网损期望值;  $\tau$  为发电机运行费用系数;  $E(p_{j(g)})$  为发电机  $j$  的出力期望值。

对于线路  $l$ , 设其两端母线分别为  $f$  和  $t$ , 则由母线  $f$  到  $t$  流过线路  $l$  的潮流可表示为:

$$\tilde{f}_{l(f,t)} = V_f I_{ft}^* \quad (12)$$

其中,  $\tilde{f}_{l(f,t)}$  为线路  $l$  的潮流;  $V_f$  为母线  $f$  的电压;  $I_{ft}$  为线路  $l$  流过的电流。当忽略线路对地导纳, 并假设母线电压幅值维持在 1 p.u. 时, 上式可表示为:

$$\tilde{f}_{l(f,t)} = V_f y_{ft}^* (V_f^* - V_t^*) = y_{ft}^* [1 - \cos(\theta_f - \theta_t) - j \sin(\theta_f - \theta_t)] \quad (13)$$

其中,  $y_{ft} = g_{ft} + j b_{ft}$  为线路  $l$  导纳;  $\theta_f$  为母线  $f$  的电压相角;  $\theta_t$  为母线  $t$  的电压相角。仅考虑有功功率时, 式(13)可简写为:

$$\tilde{f}_{l(f,t)} = g_{ft} [1 - \cos(\theta_f - \theta_t)] - b_{ft} \sin(\theta_f - \theta_t) \quad (14)$$

同理, 可以写出  $\tilde{f}_{l(t,f)}$  的形式:

$$\tilde{f}_{l(i,f)} = g_{lf} [1 - \cos(\theta_i - \theta_f)] - b_{lf} \sin(\theta_i - \theta_f) \quad (15)$$

根据式(14)和(15)可得线路  $l$  的网损表达式:

$$P_{l(\text{loss})} = \tilde{f}_{l(f,t)} + \tilde{f}_{l(i,f)} = 2g_{lf} [1 - \cos(\theta_i - \theta_f)] \quad (16)$$

输电网规划中,不同控制变量、状态变量应该满足对应的物理特性约束,具体可表示为如下形式。

新建线路数量约束:

$$I_l \leq I_l \leq \bar{I}_l \quad l \in \Lambda \quad (17)$$

其中,  $\bar{I}_l$ 、 $I_l$  分别为线路  $l$  可扩展回路数量上、下限。

节点功率平衡约束:

$$\sum_{j \in N_{i(g)}} P_{j(g),s} + \sum_l f_{l,s} + \sum_{w \in N_{i(\text{Re})}} P_{w(\text{Re}),s} = P_{i(\text{load}),s} \quad (18)$$

其中,  $P_{j(g),s}$  为在场景  $s$  中母线  $i$  处发电机  $j$  出力;  $N_{i(g)}$  为母线  $i$  上常规发电机集合;  $f_{l,s}$  为在场景  $s$  下线路  $l$  上流过的有功潮流;  $P_{w(\text{Re}),s}$  为在场景  $s$  下风力发电机  $w$  出力;  $P_{i(\text{load}),s}$  为场景  $s$  下母线  $i$  的负荷;  $N_{i(\text{Re})}$  为母线  $i$  处所有风电机组集合。

潮流方程约束:

$$f_{l,s} = B_l(\theta_{l(f),s} - \theta_{l(i),s}) \quad (19)$$

其中,  $B_l$  为线路  $l$  的电纳;  $\theta_{l(f),s}$  为在场景  $s$  中线路  $l$  上有功潮流流出节点的相角;  $\theta_{l(i),s}$  为在场景  $s$  中线路  $l$  上有功潮流流入节点的相角。

线路容量约束:

$$\bar{f}_l \leq f_{l,s} \leq \underline{f}_l \quad (20)$$

其中,  $\bar{f}_l$ 、 $\underline{f}_l$  分别为线路  $l$  容量上、下限。

发电机出力约束:

$$\underline{P}_{j(g)} \leq P_{j(g),s} \leq \bar{P}_{j(g)} \quad j \in N_g \quad (21)$$

其中,  $\bar{P}_{j(g)}$ 、 $\underline{P}_{j(g)}$  分别为发电机  $j$  的出力上、下限。

风电出力约束:

$$0 \leq P_{w(\text{Re}),s} \leq \bar{P}_{w(\text{Re}),s} \quad w \in N_{\text{Re}}, \forall s \in \Xi \quad (22)$$

其中,  $\bar{P}_{w(\text{Re}),s}$  为场景  $s$  中风电机组  $w$  的最大出力;  $\Xi$  为点估计法采样点集合。

对于母线电压相角、线路潮流可采用其期望值作为目标函数及约束条件中的数值,期望值的计算由式(7)给出。

## 2.2 MPSO 求解规划模型

粒子群优化算法是 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年提出的一种群体智能优化算法<sup>[17]</sup>。标准粒子群优化算法由于粒子多样性较差、种群进化策略单一的缘故,容易出现“早熟”现象。本文在标准粒子群优化算法的基础上引入分种群,分别采用动态惯性权重和云自适应惯性权重来更新粒子速度,在分种群之间采用“信息联络”机制,使得不同的分种群可以进行信息交流,从而大幅增加粒子的多样性,增强了粒子寻优的能力。

本文多种群粒子群的速度和位置在迭代第  $o$  次时的更新策略可表示为:

$$V_{id}^{o+1} = \omega V_{id}^o + c_1 r_1 (P_{id}^o - X_{id}^o) + c_2 r_2 (P_{gd}^o - X_{id}^o) + c_3 r_3 (P_{gmd}^o - X_{id}^o) \quad (23)$$

$$X_{id}^{o+1} = X_{id}^o + V_{id}^{o+1} \quad (24)$$

其中,  $V_{id}^o$  为第  $o$  次迭代时粒子的速度;  $\omega$  为惯性权重;  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  为学习因子;  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$  为  $0 \sim 1$  之间的随机数;  $P_{gd}^o$  为第  $o$  次迭代时种群  $g$  中最优个体;  $X_{id}^o$  为第  $o$  次迭代时粒子的位置;  $P_{gmd}^o$  为第  $o$  次迭代时所有种群中最优个体。  $c_3 r_3 (P_{gmd}^o - X_{id}^o)$  表示“信息共享”部分。

动态惯性权重的更新可表示为<sup>[18]</sup>:

$$\omega(o) = \omega_s + (\omega_s - \omega_e) [2o/T_{\max} - (o/T_{\max})^2] \quad (25)$$

其中,  $\omega(o)$  为第  $o$  次迭代时的惯性权重;  $\omega_s$ 、 $\omega_e$  分别为惯性权重的初始值和结束值;  $T_{\max}$  为粒子群最大迭代次数。

X 条件云发生器<sup>[19]</sup>产生的自适应权重的更新可表示为:

$$\omega_i(o) = \omega_s - \omega_e e^{-\frac{(f_{oi} - E_x)^2}{2(E'_n)^2}} \quad (26)$$

其中,  $\omega_i(o)$  为第  $i$  个粒子在第  $o$  次迭代时的惯性权重;  $f_{oi}$  为第  $i$  个粒子在第  $o$  次迭代时的适应度值;  $E_x$  为该种群适应度均值;  $E'_n$  为以熵  $E_n$  为期望、超熵  $H_e$  为方差的随机数,关于熵和超熵,可以参考文献[20]。

使用 MPSO 求解输电网规划模型的流程如下。

a. 输入算法参数和网络信息。

b. 初始化种群,将种群分为 2 个子种群,以点估计法概率潮流计算线损期望值,求得粒子适应度值,设置迭代次数  $o=1$ 。

c. 种群 1 按照式(25)更新惯性权重,种群 2 按照式(26)更新惯性权重。2 个种群均分别按照式(23)、(24)更新粒子的速度和位置信息。

d. 计算粒子的适应度,迭代次数  $o=o+1$ 。

e. 判断是否满足迭代次数的要求。如果不满足,则转步骤 c; 如果满足,则输出结果。

## 3 算例分析

以修改的 IEEE-RTS 24 节点系统为例,将原有节点负荷增加 1.5 倍,发电机装机容量增加 1.5 倍。以修改后的节点负荷值为期望值,变异系数取为 5%,负荷波动服从正态分布。母线 3、18 分别接入额定容量为 100 MW 的风电。单台风机额定功率为 1 MW,切入风速  $v_{in} = 3.5$  m/s,额定风速  $v_r = 13$  m/s,切出风速  $v_{out} = 25$  m/s。以年综合费用作为目标函数,贴现率取为 0.1,经济使用年限为 15 a,电量损失成本为 0.5 元/(kW·h),负荷最大利用小时数为 5 000 h,线路单位长度的造价为 500 万元。粒子群参数设置如下:迭代次数为 200,种群规模为 80,  $\omega_s = 0.9$ ,  $\omega_e = 0.4$ ,学习因子均取 2。取负荷间弱相关性 0.2,2 个

风电场间风速相关性系数为 0.5。

### 3.1 相关性分析

在本文算例中,负荷维度较高,共有 17 条母线上分布有负荷,难以对数据可视化。因此,为了可视化相关性对采样样本的影响,以风速间相关性为例,研究不同相关性系数对风速采样值的影响。图 1 给出不同相关性系数时 2 个风电场风速的散点图,A、B 分别表示母线 3、18 接入电网的风电场。

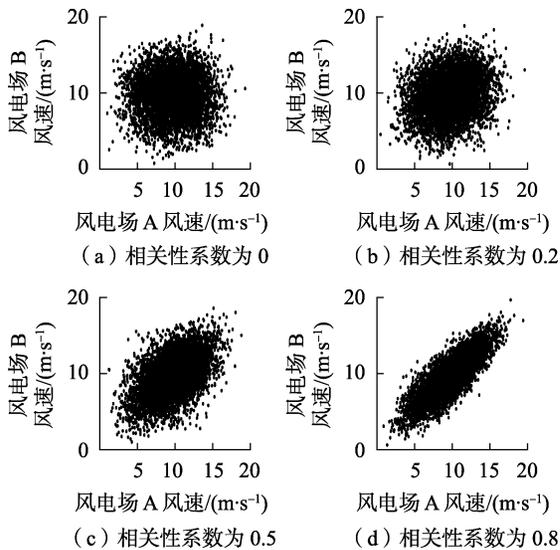


图 1 不同相关性系数时的风速散点图

Fig.1 Scatter plot of wind speed with different correlation coefficients

由图 1 可以看出,随着风速间相关性系数增大,其采样值趋于集中。当相关性系数达到 0.8 时,散点图呈现椭圆形,表明风速同时出现较大值和较小值的概率增加。对上述 4 种相关性风速进行统计,以 2 个风电场风速同时小于 5 m/s 或大于 15 m/s 分别表示风速极小值和极大值,结果显示 4 种相关性下风速出现极值的占比分别为 0.32%、0.62%、1.64%、3.46%。可见,随着相关性增强,风速出现极大值和极小值的概率增加。

为了更详细地分析相关性对风速和负荷采样值的影响,本文以总体均值 PM (Population Mean) 和样本方差均值 MSV (Mean of Sample Variance) 为指标来表征相关性对风速采样值的影响。其中,总体均值表示样本的均值大小,样本方差均值表示样本的平均离散程度。

$$PM = \frac{1}{S_N} \sum_{i=1}^{S_N} \left( \frac{1}{W_n} \sum_{j=1}^{W_n} v_{ij} \right) \quad (27)$$

$$MSV = \frac{1}{S_N} \sum_{i=1}^{S_N} \left[ \frac{1}{W_n - 1} \sum_{j=1}^{W_n} (v_{ij} - \bar{v}_i)^2 \right] \quad (28)$$

其中, $S_N$  为采样总次数; $W_n$  为风电场个数; $v_{ij}$  为第  $i$  次采样时第  $j$  个风电场风速值; $\bar{v}_i$  为第  $i$  次采样所有风电场风速的平均值。

不同季节的风电出力及负荷具有不同的特点,为了体现本文所提模型和指标的通用性,对不同参数下的指标进行计算。设置如下场景:风速相关性中,参数 1 中比例参数和形状参数取值分别为 10.7 和 3.97,参数 2 中比例参数和形状参数取值分别为 9.0 和 2.16;负荷相关性中,参数 1 负荷变异系数为 5%,参数 2 负荷变异系数为 15%。指标结果分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 不同风速相关性系数下 PM 和 MSV 指标值

Table 1 Index of PM and MSV with different wind speed correlation coefficients

风速相关性系数	参数 1		参数 2	
	PM	MSV	PM	MSV
0	9.694 3	7.404 3	7.970 4	15.082 9
0.2	9.694 3	5.953 4	7.970 4	12.147 4
0.5	9.694 4	3.681 5	7.970 4	7.447 0
0.8	9.694 4	1.326 9	7.970 4	2.571 0

表 2 不同负荷相关性系数下 PM 和 MSV 指标值

Table 2 Index of PM and MSV with different load correlation coefficients

负荷相关性系数	参数 1		参数 2	
	PM	MSV	PM	MSV
0	251.4	13 771	251.4	15 280
0.2	251.4	13 742	251.4	15 011
0.5	251.4	13 695	251.4	14 598
0.8	251.4	13 649	251.4	14 172

根据表 1 和表 2,从 PM 和 MSV 指标可以看出,相关性对总体样本均值的影响非常小,可以忽略不计,但对 MSV 指标影响较大。从风速数据可以看出,随着相关性的增强,样本方差均值在逐渐减小,与风速散点图呈现的趋势相同。

从表 2 可以看出,与风速相关性类似,随着相关性增强,负荷采样值的离散程度也在减小。而对比不同变异系数时的指标,参数 2 的离散程度变化更大。当变异系数增大时,负荷的波动范围更大,相关性对其采样值的影响也变得更为明显。从电网规划角度考虑,当负荷的预测误差较大时,相关性对规划结果的影响将不可忽略。

### 3.2 随机潮流精度验证

首先分析分位数拟合法的精度。以双参数威布尔分布为例,分别计算不同分位点的拟合效果。以拟合值与准确值的相对误差表征拟合精度,采用 4 阶多项式拟合,计算结果如表 3 所示。

表 3 分位数拟合法计算精度

Table 3 Calculation accuracy of percentile fitting method

$p$	$z^w$	$z^*$	$\zeta/\%$
0.025	4.238 6	4.269 2	0.72
0.2	7.333 3	7.335 1	0.02
0.5	9.756 4	9.746 1	0.11
0.8	12.062 7	12.067 8	0.04
0.99	15.719 7	15.723 8	0.03

表中,  $z^*$  为由式(4)拟合得到的结果,  $z^w$  为由威布尔分布计算得到的实际值,  $\zeta$  由下式给出:

$$\zeta = \left| \frac{z^* - z^w}{z^w} \right| \times 100\% \quad (29)$$

根据表 3 可以看出,采用分位数拟合法计算多项式正态变化系数具有很高的精度,采用 4 阶拟合时最大误差未超过 1%。随着拟合阶数的增多,精度提高,但计算时间并没有显著增加。当拟合达到 10 阶时,拟合值与实际值相同。

随机潮流精度的验证仍然采用式(29),此时,  $z^*$  表示本文所提方法的计算结果,  $z^w$  表示采用拉丁超立方采样的计算结果<sup>[21]</sup>。线路有功潮流  $P_{line}$ 、母线电压  $V$ 、母线相角  $\theta$  的结算结果如表 4 所示。

表 4 输出随机变量期望值的相对误差  
Table 4 Relative errors of expected value of output variables

指标	误差均值/%	最大值/%
$P_{line}$	0.31	1.82
$V$	0.11	1.17
$\theta$	0.56	1.45

由表 4 可以看出,本文所提基于分位数拟合的点估计法概率潮流具有很高的精度。从电网规划角度分析,仅考虑有功潮流时,本文所提方法计算的线路潮流最大误差仅为 1.82%,能够满足电网规划对潮流精度的要求。

### 3.3 相关性对输电网规划的影响

本节在 3.1 和 3.2 节的基础上,研究风速间相关性和负荷间相关性对输电网规划的影响。不同季节风电出力以及负荷的特点在模型中以不同参数的形式体现,本文的重点在于提出考虑相关性的通用模型,参数的变化并不影响模型的实用性。因此,本节以年最大负荷为例,负荷变异系数 5%,风速威布尔分布参数分别取 10.7 和 3.97,规划结果如表 5 所示。本文共研究 4 种场景:初始场景 1;场景 2,设置负荷相关性系数 0.8,风速相关性系数不变;场景 3,设置负荷相关性系数 0.5,风速相关性系数 0.2;场景 4,设置负荷相关性系数 0.5,风速相关性系数 0.8。

表 5 不同相关性系数下的输电网规划方案  
Table 5 Transmission network planning schemes with different correlation coefficients

场景	规划方案	年综合费用/亿元	平均过负荷量/MW
1	1-5,2-6,14-16,16-17	44.34	1.50
2	1-5,2-6,14-16,16-17,18-21	44.79	6.86
3	1-5,2-6,14-16,16-17	44.57	3.71
4	1-5,2-6,14-16,16-17	44.31	4.23

对比以上规划结果可以看出,当风速相关性一定时,随着负荷相关性增大,系统中各母线负荷同时出现极大值、极小值的概率增加,为了应对运行过程

中出现的极端工况,系统需要投建更多的线路以加强网架来保证系统的可靠性。而当负荷相关性一定时,随着风速相关性的增强,在给定边界条件下系统的规划结果并无变化。由于风电场容量较小,系统无外送风电的需求,不需要新增输电线路。此外,风电场出力虽然会在 0 和额定值之间波动,但其仍可替代部分常规机组。然而,在发电机再调度过程中,并未出现由于线路传输容量约束造成的系统阻塞,从经济性角度考虑,不需要新增输电线路。在本算例中,2 个场景的线路最大负载率分别为 87.15% 和 86.90%,并未出现线路过载的问题。

为了研究所得规划方案对不确定因素的适应性,以表 5 中规划方案为例,仍然采用文献[21]中的方法对风速和负荷进行采样,计算规划方案在不同运行场景中的平均切负荷量。由表 5 可知,所得规划方案在应对负荷和风速波动时具有很强的鲁棒性,最高切负荷也仅有 6.86 MW,实际运行中可通过诸如负荷侧管理等控制手段加以消除。

本文进一步研究了风电场容量及风速相关性对电网规划的影响。规划示意图如图 2 所示,计算结果如表 6 所示。由表 6 可知,风电场容量和风速相关性系数变化时会影响系统的规划方案。当相关性系数增大时,风电场出力同时达到较大值的概率增加,一方面由于本地负荷不能完全消纳风电,需要外

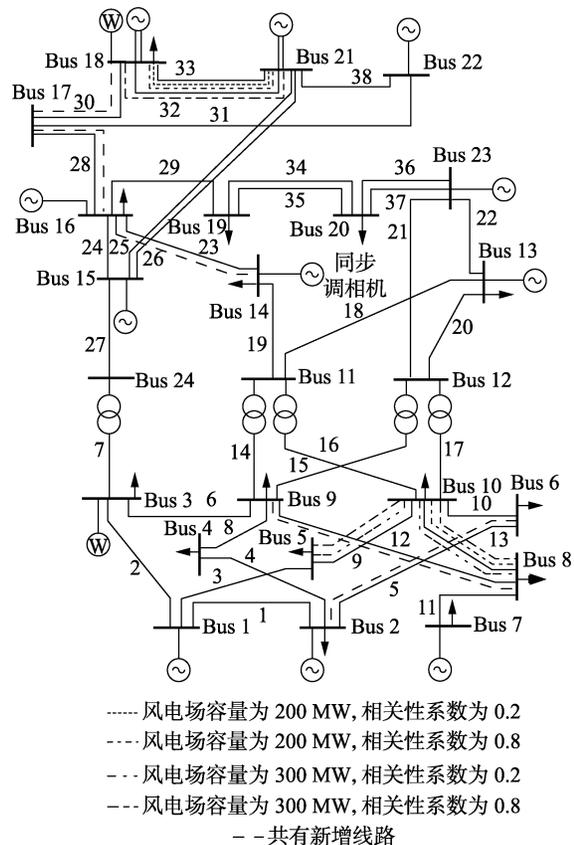


图 2 规划示意图

Fig.2 Schematic diagram of planning schemes

表 6 不同风电场容量及相关性系数下的输电网规划方案

Table 6 Transmission network planning schemes with different wind farm capacities and correlation coefficients

风电场容量/MW	相关性系数	规划方案	投资成本/亿元	燃料成本/亿元	网损成本/亿元
200	0.2	2-6,8-9,14-16,16-17,17-18,18-21	2.23	36.82	4.39
	0.8	2-6,8-9,8-10,14-16,16-17,17-18,18-21	2.34	36.55	4.30
300	0.2	2-6,5-10,8-9,8-10,14-16,16-17,17-18	2.42	35.30	4.26
	0.8	2-6,5-10,8-9,8-10,14-16,16-17,17-18,18-21	2.66	34.63	4.34

送给其他节点的负荷;另一方面,由于运行费用占据较大的比重,当风电满足一部分负荷后,发电机再调度时会把煤耗量低的机组发电量通过新建线路外送,进一步降低系统的运行费用。

#### 4 结论

可再生能源并网规模逐渐增大,其出力的特性对电力系统的影响不可忽略。为了全面反映不确定因素对电力系统规划的影响,本文通过对随机变量进行建模,以随机潮流为基础,研究了风速、负荷相关性对输电网规划的影响。主要结论如下:

a. 分位数拟合法能够处理随机变量间相关性,且其对分位数的拟合具有很高的效率,基于该方法的点估计法随机潮流计算精度较高;

b. 随着随机变量间相关性的增强,其同时出现极大值、极小值的概率增加,随机变量采样值的离散程度减小,MSV 指标很好地反映了这种特性;

c. 负荷、风速相关性会影响电网规划结果,但是当风电场容量较小时,对电网规划方案的影响较弱,当风电场容量较大且风速相关性较强时对电网规划结果的影响比较明显。

本文目标函数主要考虑经济性,如何将安全性、可靠性指标作为规划目标函数,建立多目标规划模型也值得未来进一步研究。

#### 参考文献:

[1] AGHAEI J, AMJADY N, BAHARVANDI A, et al. Generation and transmission expansion planning: MILP-based probabilistic model [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1592-1601.

[2] 雷若冰,徐箭,孙辉,等. 基于相关性分析的风电场群风速分布预测方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 134-140.  
LEI Ruobing, XU Jian, SUN Hui, et al. Wind speed distribution forecasting based on correlation analysis for wind farm group [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 134-140.

[3] 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.

[4] 洪绍云,程浩忠,曾平良,等. 输电网扩展优化规划研究综述[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3102-3107.  
HONG Shaoyun, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. Review

of transmission network expansion optimization planning [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3102-3107.

[5] 田书欣,程浩忠,曾平良,等. 大型集群风电接入输电系统规划研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1566-1574.  
TIAN Shuxin, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. Review of transmission planning for integrating large clusters of wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1566-1574.

[6] 周金辉,余贻鑫,曾沅. 大规模风电接入下输电网扩展规划的启发式优化算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 66-70.  
ZHOU Jinhui, YU Yixin, ZENG Yuan. Heuristic optimization algorithm for transmission network expansion planning with large-scale wind power integration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 66-70.

[7] 袁越,吴博文,李振杰,等. 基于多场景概率的含大型风电场的输电网柔性规划[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 8-12.  
YUAN Yue, WU Bowen, LI Zhenjie, et al. Flexible planning of transmission system with large wind farm based on multi-scenario probability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 8-12.

[8] 范宏,程浩忠,唐永红,等. 相关机会二层规划法在输电网扩展规划中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 59-63.  
FAN Hong, CHENG Haozhong, TANG Yonghong, et al. Application of dependent-chance bilevel programming in transmission network expansion planning [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 59-63.

[9] YU H, CHUNG C, WONG K, et al. A chance constrained transmission network expansion planning method with consideration of load and wind farm uncertainties [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1568-1576.

[10] 杨欢,邹斌. 含相关性随机变量的概率潮流三点估计法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 51-56.  
YANG Huan, ZOU Bin. A three-point estimate method for solving probabilistic power flow problems with correlated random variables [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 51-56.

[11] XIAO Q. Generating correlated random vector by polynomial normal transformation [EB/OL]. [2016-12-10]. <http://arxiv.org/pdf/1508.06433v1.pdf>.

[12] 方斯顿,程浩忠,徐国栋,等. 随机最优潮流及其应用的研究综述[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 1-10.  
FANG Sidun, CHENG Haozhong, XU Guodong, et al. Reviews on stochastic optimal power flow and its application [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 1-10.

[13] 雷加智,龚庆武. 基于改进点估计法的输电线路过负荷风险评估[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 67-72, 81.  
LEI Jiazhi, GONG Qingwu. Transmission line overload risk assessment based on improved point estimation methods [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 67-72, 81.

[14] 芦晶晶,赵渊,赵勇帅,等. 含分布式电源配电网可靠性评估的点估计法[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2250-2257.  
LU Jingjing, ZHAO Yuan, ZHAO Yongshuai, et al. A point estimation

- method for reliability evaluation of distribution network with distributed generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2250-2257.
- [15] LI Y M, LI W Y, YAN W, et al. Probabilistic optimal power flow considering correlations of wind speeds following different distributions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1847-1854.
- [16] MORALES J M, PÉREZ-RUIZ J. Point estimate schemes to solve the probabilistic power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1594-1601.
- [17] EBERHART R C, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]//Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. MHS'95. Nagoya, Japan: IEEE, 1995: 39-43.
- [18] SHI Y H, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer[C]//IEEE World Congress on Computational Intelligence. Anchorage, USA: IEEE, 1998: 69-73.
- [19] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20.  
LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators[J]. Computer R&D, 1995, 32(6): 15-20.
- [20] 戴朝华, 朱云芳, 陈维荣, 等. 云遗传算法及其应用[J]. 电子学报, 2007, 35(7): 1419-1424.  
DAI Chaohua, ZHU Yunfang, CHEN Weirong, et al. Cloud model based genetic algorithm and its applications[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(7): 1419-1424.
- [21] SHU Z, JURUTTIJAROEN P. Latin hypercube sampling techniques for power systems reliability analysis with renewable energy sources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2066-2073.

#### 作者简介:



张 衡

张 衡(1991—),男,河南郑州人,博士研究生,主要研究方向为电力系统规划以及经济调度(**E-mail**: hengzhang\_ee@163.com);

程浩忠(1962—),男,浙江东阳人,教授,博士,主要研究方向为电力系统规划、电能质量、电压稳定性、电力市场等。

## Application of stochastic power flow based on quantile fitting point estimation method in transmission network expansion planning

ZHANG Heng<sup>1</sup>, CHENG Haozhong<sup>1</sup>, ZENG Pingliang<sup>2</sup>, ZHANG Jianping<sup>3</sup>, LU Jianzhong<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. East China Power Grid Company, Shanghai 200002, China)

**Abstract:** In order to describe the uncertain factors, i.e. load fluctuation and wind power, faced in TNEP (Transmission Network Expansion Planning) more thoroughly, a transmission network optimization planning model is built based on stochastic power flow using PEM (Point Estimation Method), which takes the minimum annual comprehensive cost as its objective function and considers the network loss. The polynomial normal transformation technology is introduced to deal with the correlation of non-normal variables. The quantile fitting method based on least square is adopted to obtain the coefficients of polynomial normal transformation, effectively avoiding the integral operation. The impact of the correlation on wind power is quantified by the indexes of PM (Population Mean) and MSV (Mean of Sample Variance). The improved PSO (Particle Swarm Optimization) algorithm is used to analyze the modified IEEE-RTS 24-bus system, and results show that the probability of extreme values of load and wind speed is rising along with the increase of correlation, and power grid needs to build more lines to deal with the uncertain factors.

**Key words:** transmission network expansion planning; point estimation method; correlation; stochastic optimal power flow; particle swarm optimization algorithm