

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209153

基于 BOX-COX 变换与改进核密度估计潮流计算*

刘会家 江旭旭

(三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002)

摘要: 为研究多个光伏电站出力存在相关性的概率潮流计算,提出一种基于 BOX-COX 变换法与改进的非参数核密度估计的多光伏电站联合概率潮流的计算方法。首先,为描述多光伏电站出力的相关性及其强度,结合 Gumbel Copula 函数和 Gini 系数建立联合密度函数;然后,基于 Box-Cox 正态变换法和改进 LDU 三角分解法分别将光伏出力正态化和独立化处理并对光伏出力进行综合建模,根据半不变量法与 Cornish-Fisher 级数展开计算节点电压、支路潮流的概率分布,并将该计算结果分别与传统非参数核密度估计和蒙特卡洛方法进行对比。实际算例仿真结果表明,该方法计算精度高、时间短,仅用时 3.17 s,有一定的实用性且解决传统蒙特卡洛方法效率较低问题。

关键词: 非参数核密度估计;正态变换;相关性;概率潮流

中图分类号: TM744 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4047

Load flow calculation based on box-cox transform and improved kernel density estimation

Liu Huijia Jiang Xuxu

(School of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to study the probability power flow calculation of multiple power plants with output correlation. A combined probabilistic power flow calculation method based on Box-Cox transform and nonparametric kernel density model is proposed for multiple photovoltaic power plants. Firstly, combining Gumbel Copula function and Gini coefficient, the density function is established to describe the correlation and intensity of photovoltaic output. Then, based on Box-Cox normal transformation method and improved LDU triangulation method, the PV output is normalized and independent respectively, and comprehensive modeling of PV output is carried out. Finally, the Cumulant Method combined with Cornish-Fisher series expansion is used to calculate the probability power flow, and the probability distribution of node voltage and branch power flow is obtained and the results are compared with traditional nonparametric kernel density estimation and Monte Carlo method. The simulation results of a practical example show that the proposed method has high accuracy and less time, it took just 3.17 seconds, it has certain practicability and solves the problem of low efficiency of the traditional Monte Carlo method.

Keywords: nonparametric kernel density model; normal transformation; correlation; probabilistic load flow

0 引言

随着光伏发电的普及,光伏出力的波动性和随机性使得光伏并网给配电网带来了不确定性^[1-2]。在电力系统的运行控制过程中,考虑多个光伏电站之间的相关性,针对相邻的光伏发电站出力的相关性,文中采用金融领域常用的分析相关性的方法——Gumbel Copula 函数。目前,已有大量学者对概率潮流(probabilistic load flow, PLF)进行研究。处理 PLF 的方法主要有模拟法^[3]、近似法^[4-6]与解析

法^[7-9]。文献[10]用蒙特卡洛仿真法(monte carlo simulation method, MCSM)来计算存在相关性的分布式电源并网的概率潮流,但其分析需要大量数据为基础,计算速度较慢,一般作为其他方法的评论依据。文献[11]运用卷积法依据输入变量、输出变量之间的线性关系进行计算,避免了 MCSM 的多次迭代问题。但上述方法考虑的是风电之间相关性,并且在处理相关性时采用 Cholesky 分解,高阶时计算量较大,无法应用于多个光伏电站联合概率潮流计算。并且在考虑光伏出力的样本数据时,大都假设其服

收稿日期:2022-03-03

* 基金项目:国家自然科学基金(51477090)项目资助

从 Beta 分布,若实际情况与假设不符,则会造成较大偏差。文献[12]提出一种综合建模方法来分析光伏与负荷之间的相关性,该模型不需任何假设,减小了实际误差,但是其模型建立过程中始终保持固定带宽,从而存在局部自适应差问题;文献[13]将自适应非参数核密度模型^[14](nonparametric kernel density model, NKDM)与边界核函数结合,提出一种改进的非参数核密度模型用来分析电动公共客车的负荷情况,该方法有效解决传统非参数核密度估计局部适应性差的问题,有一定的实用性;文献[15]、[16]均采用改进的前推回代法分析了分布式电源并网后配电网不同种类节点的潮流分布,有一定创新性,但计算过程复杂,计算量较大;

目前有少量方法来考虑光伏发电的相关性和潮流计算以及光伏出力模型缺乏局部适应性和存在边界偏差问题,文中在 Box-Cox 正态变换法的基础上,将自适应非参数核密度与反射法非参数核密度相结合,提出一种基于 Box-Cox 变换和改进非参数核密度模型的概率潮流计算方法(PLF with Box-Cox inverse transformation and improved nonparametric kernel density model, PLF-BCKDE),以解决光伏出力数据不服从 Beta 分布和相邻发电站之间存在相关性,并且弥补了传统 KDE 边界存在偏差和自适应差问题。

1 光伏发电的相关性分析计算

1.1 基于 copula 函数的联合分布函数

基于 copula 函数的联合分布函数可表示为:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) \quad (1)$$

式中: $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为联合分布函数, $F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)$ 分别为随机变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)。当 $F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)$ 连续, C 是唯一值。

用 Gumbel Copula 函数分析相关性潮流并建立概率密度函数(probability density function, PDF):

$$C_G(u, v; \alpha) = \exp(-[(-\ln u)^{\frac{1}{\alpha}} + (-\ln v)^{\frac{1}{\alpha}}]^{\alpha}) \quad (2)$$

式中: u, v 为系统输入变量,且 $0 < u, v < 1$; α 为函数的参数。为简化计算,文中选取 $\alpha = 2$ 。

为了解其相关性的强度,应用 Gini 系数 γ 对其相关性强度进行表示, γ 更细致的考虑了随机变量变化顺序的一致性和不一致性。其表达式为:

$$\gamma = \frac{1}{\text{int}(n^2/2)} (\sum_{i=1}^n |r_i + s_i - n - 1| - \sum_{i=1}^n |r_i - s_i|) \quad (3)$$

式中: (r_i, s_i) 为样本 (x_i, y_i) 的秩($i=1, 2, 3, \dots, n$)。

Gumbel Copula 函数与 Gini 系数结合不仅能够描述相邻发电站出力的相关性,而且能够对其相关性的强弱进行分析。

1.2 改进的 LDU 三角分解

因为光伏电站之间的相关性,半不变量法(cumulant method, CM)不能直接用来计算 PLF,因此要对具有相关性的数据进行独立变换。传统变换方法有 Nataf 变换、Cholesky 分解^[17]、Rosenblatt 变换等。其中 Nataf 变换过程复杂,且当样本不服从高斯分布时计算误差较大,需要对其改进^[18-20]; Cholesky 分解只有当输入变量矩阵不超过二阶时,计算速度相对较快,当输入变量矩阵为三阶及以上时,计算较为复杂。文中结合以上原因采用改进的 LDU 三角分解法,即使当输入变量矩阵为高阶时,计算过程也相对简单。

传统 LDU 三角分解计算过程复杂且计算量大^[21],改进的 LDU 三角分解弥补了高阶 Cholesky 分解的不足,引入合成阵,既可体现 L, D, U 元素之间的关系又能大大减少存储单元,简化了计算过程。以四阶矩阵 $A = LDU$ 为例,其计算方法如下:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ l_{21} & 1 & 0 & 0 \\ l_{31} & l_{32} & 1 & 0 \\ l_{41} & l_{42} & l_{43} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & u_{12} & u_{13} & u_{14} \\ 0 & 1 & u_{23} & u_{24} \\ 0 & 0 & 1 & u_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: A 为具有相关性的输入变量矩阵, L 为单位下三角矩阵, D 为对角阵, U 为单位上三角矩阵。

将 L, D, U 三个因子式的乘积与 A 矩阵的元素进行对比,得到计算结果如式(5)~(8)等,就可解出因子式中的各个元素。

$$a_{11} = d_{11} \quad (5)$$

$$a_{12} = d_{11}u_{12} \quad (6)$$

$$a_{13} = d_{11}u_{13} \quad (7)$$

$$a_{14} = d_{11}u_{14} \quad (8)$$

.....

在正态变换的基础上结合改进后的 LDU 三角分解,处理了输入量的相关性。

1.3 Box-Cox 正态变换

Box-Cox 正态变换是一种用数据本身估算参数来确定变换形式的方法。该变换方法能够明显改善数据的正态性,其一般形式为:

$$y(\lambda) = \begin{cases} \frac{y^{\lambda} - 1}{\lambda}, & \lambda \neq 0 \\ \ln y, & \lambda = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $y(\lambda)$ 为新变量, y 为原始因变量, λ 为引入参数。当原始输入量出现负值时,式(9)可将原始数据同时加上常数 a 使 $(y + a)$ 为正值,然后进行变换。

设随机相关输入回归变量为 y_1, y_2, \dots, y_n , 通过式(9)

变换后得到向量 $y^{(\lambda)} = (y_1^{(\lambda)}, \dots, y_n^{(\lambda)})$, 用 γ_{ij} 来表示 $y_i^{(\lambda)}$ 和 $y_j^{(\lambda)}$ 之间的相关系数, 其中 $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。通过计算确定 λ 的值, 使 $y^{(\lambda)}$ 满足:

$$y^{(\lambda)} = X\beta + e, e \sim N(0, \delta^2 I) \quad (10)$$

式中: β 和 e 为回归方程的参数。

通过极大似然法求解 λ 的值, 则 β 和 δ^2 的似然函数为:

$$L(\beta, \delta^2) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\delta)^n} \exp\left\{-\frac{1}{2\delta^2}(y^{(\lambda)} - X\beta)'(y^{(\lambda)} - X\beta)\right\} J \quad (11)$$

式中: J 为变换的 Jacobi 行列式。

最后对 $y(\lambda)$ 进行改进后的 LDU 三角分解, 求出正态变换后的相互独立变量。

此方法变换后变量服从正态分布, 文中取 λ 值为 0, 使变换为对数变换形式。

2 基于半不变量法的 PLF 计算

2.1 输入变量的概率特性

PLF 计算过程中, 输入变量主要有 PV、负荷和发电机出力。负荷出力可假设其为功率因数不变的正态分布, 发电机出力可认为其服从二项分布。光伏出力在一段时间内大多服从 Beta 分布, 但也存在其他情况, 因此对光伏出力数据样本进行综合建模, 其建模流程如图 1 所示。

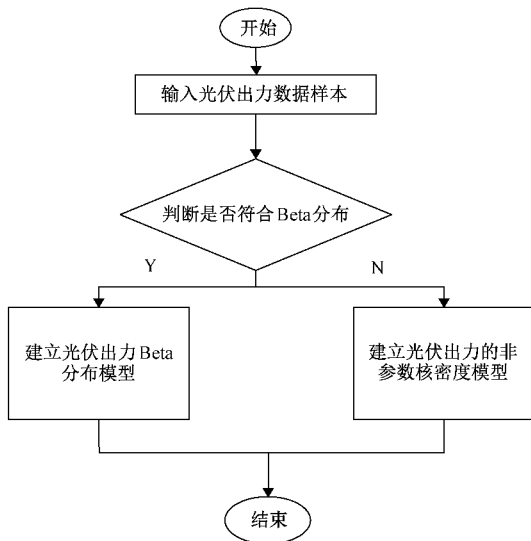


图 1 光伏综合概率模型的建立方法

其中, χ^2 检验方法为:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(m_i - mp_i)^2}{mp_i} \quad (12)$$

式中: 将光伏出力的 m 个样本分为 n 组无交集数据样本后, m_i 为第 i 个光伏输出功率区间的观测频数; p_i 为第 i 个光伏输出功率区间的理论概率值。

通过比较 χ^2 与其临界值 $\chi^2(n-1)$ 的大小, 若 χ^2 小于临界值, 则光伏出力服从 Beta 分布。

当光伏出力服从 Beta 分布时, 其 PDF 为:

$$f(p) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{p}{P_{\max}}\right)^{\alpha-1} \cdot \left(1 - \frac{p}{P_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (13)$$

式中: p 为光伏输出功率, P_{\max} 为最大输出功率, α 和 β 为形状系数。

当光伏出力服从 NKDM 时, 为消除边界偏差和局部自适应差, 采用改进后的非参数核密度模型, 其 PDF 为:

$$f(p) = \frac{1}{nh(p_i)} \sum_{i=1}^n \left[K\left(\frac{p-p_i}{h(p_i)}\right) + K\left(\frac{p-p_i}{h(p_i)}\right) + K\left(\frac{p-p_i}{h(p_i)}\right) \right] \quad (14)$$

式中: $[a, b]$ 为定义域, $p_i = 2a - p_i$; $p_i^1 = 2b - p_i$; n 为实测样本数据; h 和 K 分别为带宽和核函数, 并且文中带宽采用循环估计法计算, 核函数选用高斯核函数。

2.2 输入变量的半不变量计算

以上已求出相关输入变量的独立变量, 下面结合 CM 计算 PLF。其计算步骤可分为:

- 1) 输入独立的随机变量作为初始数据;
- 2) 利用牛顿-拉夫逊法^[22]用初始数据进行一次确定性潮流计算, 计算结果作为基准点, 得到输出变量和灵敏度矩阵;
- 3) 以基准值为基点, 用半不变量来描述光伏出力和负荷的扰动, 计算输入变量的半不变量;
- 4) 将得到的半不变量结合 Cornish-Fisher 级数展开, 得到输出变量的 CDF 或 PDF。

在基准点对系统的潮流方程用泰勒级数展开计算各阶半不变量, 且仅保留展开式中的一次项, 得到:

$$\begin{cases} \Delta V = J_0^{-1} \Delta N = S_0 \Delta N \\ \Delta B = G_0 J_0^{-1} \Delta W = T_0 \Delta N \end{cases} \quad (15)$$

式中: ΔV 、 ΔN 、 ΔB 分别为节点电压、节点注入功率、支路潮流扰动量, S_0 、 T_0 为灵敏度矩阵, J_0 为 Jacobi 矩阵,

$$G_0 = \left(\frac{\partial B}{\partial V}\right) \Big|_{V=V_0}$$

经式(16)求出各个节点的状态变量和各条支路各阶半不变量:

$$\begin{cases} \Delta V^{(k)} = S_0^{(k)} (\Delta N_{PV}^{(k)} + \Delta N_G^{(k)} + \Delta N_L^{(k)}) = S_0^{(k)} \Delta N^{(k)} \\ \Delta B^{(k)} = T_0^{(k)} (\Delta N_{PV}^{(k)} + \Delta N_G^{(k)} + \Delta N_L^{(k)}) = T_0^{(k)} \Delta N^{(k)} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\Delta N_{PV}^{(k)}$ 、 $\Delta N_G^{(k)}$ 、 $\Delta N_L^{(k)}$ 分别为 PV、发电机、负荷注入功率的 k 阶半不变量。

Cornish-Fisher 级数在计算概率分布时精度更高, 其展开式为:

$$f(x) = \varphi(x) + \frac{1}{6}(\varphi^2(x) - 1)K_3 + \frac{1}{24}(\varphi^3(x) - 3\varphi(x))K_4 - \frac{1}{36}(2\varphi^3(x) - 5\varphi(x))K_3^2 + \frac{1}{120}(\varphi^4(x) - 6\varphi^2(x) + 3)K_5 + \dots \quad (17)$$

式中： K_n 为随机变量 x 的 n 阶半不变量， $\varphi(x)$ 为标准正态分布的 PDF； $\varphi^q(x)$ 表示 $\varphi(x)$ 的 q 阶求导结果。

考虑输入变量相关性的 PLF 计算流程如图 2 所示。

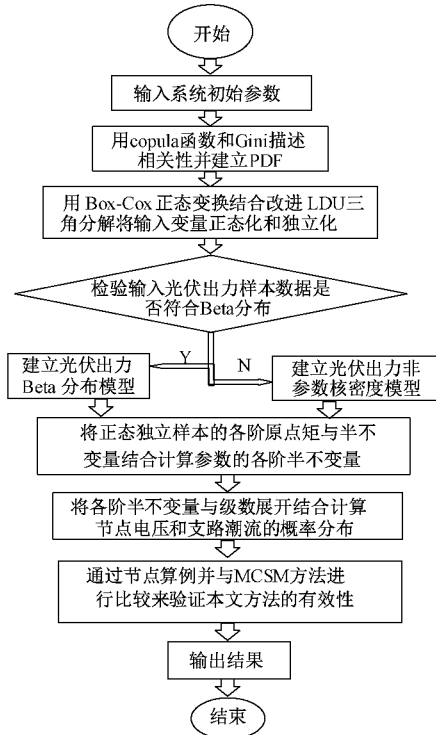


图 2 考虑输入变量相关性的 PLF 计算流程

3 算例及仿真结果分析

在 IEEE33 节点上对 PLF-BCKDE 的快速性和有效性进行分析,在节点 10、节点 21、节点 24 上分别接入 3 个光伏电站,并假设均以恒定功率因数 0.9(滞后)运行,其额定容量分别为 400、200、200 MW,总容量 800 MW。光伏电站出力采用形状系数为 α_1, β_1 分别为 2.15 和 2.50; α_2, β_2 分别为 0.92 和 0.88; α_3, β_3 分别为 0.56 和 2.58 的 Beta 分布,具体 IEEE33 节点系统如图 3 所示。

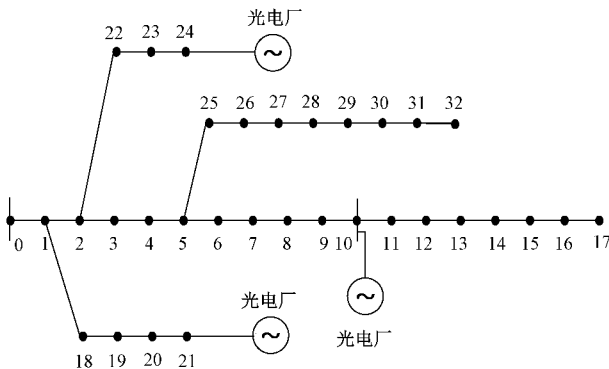


图 3 含光伏电站的 33 节点系统

在 Win10 环境下进行,仿真平台为 Intel(R) Core (TM) i5-7200U CPU@2.50 GHz,运行内存为 4 GB,仿真

软件为 MATLAB R2018b。文中对 PLF-BCKDE 和 MCSM 两种方法进行仿真,并且以 20 000 次 MCSM 随机抽样进行 PLF 计算,得到的节点电压和支路潮流作为精确值来评估 PLF-BCKDE 的快速性和有效性。

选取具有代表性的节点 9 和节点 24 分别在文献[15]所提改进前推回代法、NKDE 法、MCSM 法和本文方法下其电压幅值 CDF 进行对比,并对比了不同方法下支路 2~22 的有功和无功 CDF。对比结果如图 4~7 所示。

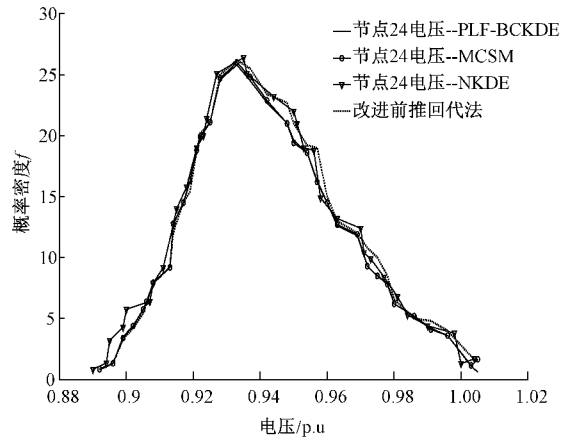


图 4 节点 24 在不同方法下的电压幅值概率分布

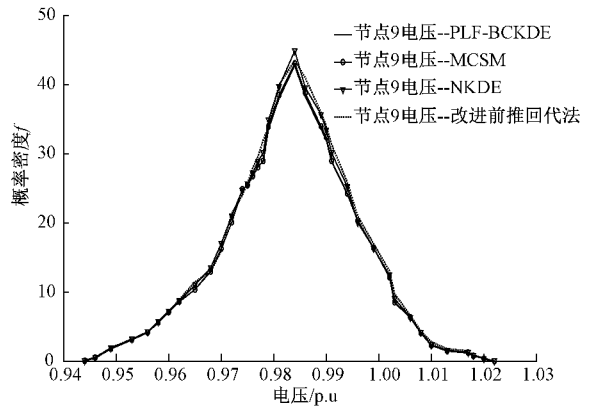


图 5 节点 9 在不同方法下的电压幅值概率分布

图 4~7 只是选取其中两个节点和一条支路作为代表进行对比分析,文中计算输出变量期望值和标准差的相对误差指标(relative error indices, REI)来分析 PLF-BCKDE 和 MCSM 两种方法下每个节点和每条支路的相对误差。REI 的表达式为:

$$\epsilon_s^\alpha = \left| \frac{X_{sBC}^\alpha - X_{sMC}^\alpha}{X_{sMC}^\alpha} \right| \times 100\% \quad (18)$$

式中： ϵ_s^α 是 REI; s 为统计特征,包括期望值和标准差,BC 和 MC 分别为 PLF-BCKDE 和 MCSM 两种不同方法, X 为相应的值; α 为输出变量类型。

以 MCSM 为参考,PLF-BCKDE 输出量的相对误差如表 1 和 2 所示。

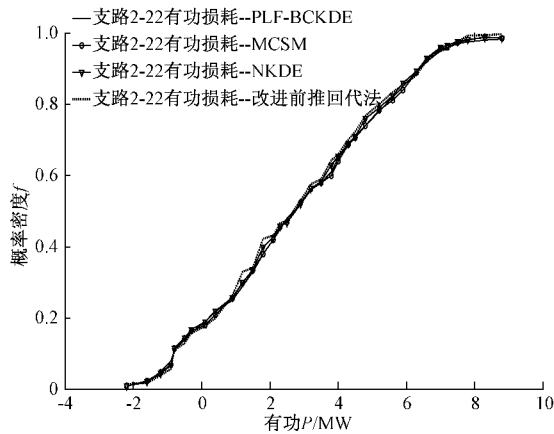


图6 支路2~22在不同方法下的有功概率分布

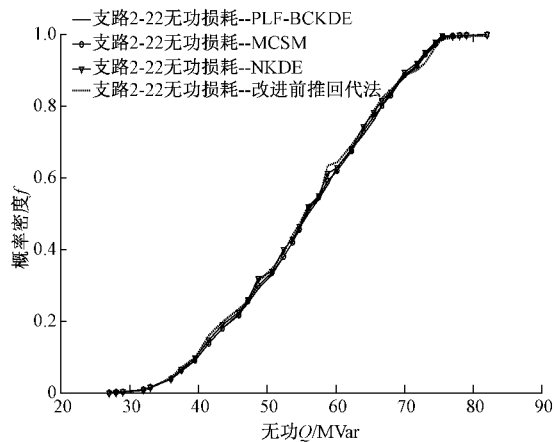


图7 支路2~22在不同方法下的无功概率分布

表1 电压幅值误差分析

节点	电压		相角	
	期望值	标准差	期望值	标准差
1	0.000 1	0.014	0.000 8	0.001 4
2	0.000 1	0.017	0.001 1	0.001 5
...
15	0.000 4	0.018	0.001 2	0.001 2
16	0.000 3	0.017	0.001 3	0.001 3
...
31	0.000 2	0.02	0.001 1	0.002 1
32	0.000 2	0.023	0.001 2	0.002
平均	0.000 32	0.020 2	0.001 2	0.001 8

从表1和2中数据可以看出 PLF-BCKDE 与 MCSM 结果误差较小,其中电压的期望值和标准差的相对误差均值仅达到 0.000 32 和 0.020 2;相角期望值和标准差相对误差均值分别仅有 0.001 2 和 0.001 8;有功期望值和标准差的相对误差均值只达到 0.014 6 和 0.035 4;无功期望值和标准差平均误差只达到 0.08 和 0.022 4,均在允许范围内。除此之外,在计算效率方面,不同方法用时对比如表3所示。

表2 支路有功、无功误差分析

支路	有功		无功	
	期望值	标准差	期望值	标准差
0~1	0.008 3	0.023 2	0.002 8	0.023
1~2	0.012 4	0.026 7	0.006	0.008 2
...
14~15	0.016 4	0.037 6	0.156 3	0.016 2
15~16	0.021	0.042 0	0.136 7	0.008 7
...
31~32	0.014 2	0.035 1	0.008 7	0.008 7
32~33	0.017 5	0.028 6	0.134 6	0.015 9
平均	0.014 6	0.035 4	0.080 0	0.022 4

表3 不同方法用时对比

方法	本文方法	MCSM	NKDE	改进前推回代法
时间/s	3.17	98.72	22.47	9.83

由表3可看出本文方法存在较大的优越性,用时较短,仅用时 3.17 s,比 MCSM 方法用时缩短近 30 倍,比 NKDE 快近 7 倍,同时比文献[15]所用改进前推回代法快近 6 s。

变换前后相邻光伏电厂的相关性强度如表4所示。

表4 相邻光伏电厂的相关性

相关系数	变换前	变换后
γ_{12}	0.865	0.014 3
γ_{23}	0.943	0.016 9
γ_{31}	0.796	0.025 4

表中 γ_{12} 表示光伏电厂 1 和光伏电厂 2 之间的相关系数并以此类推。可看出变换后其相关性很低,变换后相关性均在 0.01~0.03 之间,可看似相互独立。

4 结 论

针对相邻光伏发电厂之间出力存在相关性,本文提出一种在 Box-Cox 正态变换的基础上结合改进的核密度估计模型来分析相关性下配电网的潮流计算方法。为解决输入变量存在相关性问题,使用了改进的 LDU 三角分解,解决相关性的同时大大减小了计算量;考虑到传统光伏出力均假设其出力服从 beta 分布,提出改进的核密度估计模型,解决了光伏出力不服从 beta 分布问题的同时弥补了传统 KDE 边界存在偏差和白适应差问题,有效提高了光伏出力概率分布的准确性和适用性。但本文仍存在不足,比如在计算方面文中出现假设部分,使结果准确性达不到精确值。愿之后的更多学者能够在此领域给出更简便、准确的方法及结果。

参考文献

[1] 金楚,黎嘉明,徐沈智,等.大规模光伏发电并网概率潮

- 流计算及对电网的影响[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1):1-8.
- [2] 蒋斌, 吴健, 冯亮, 等. 含分布式发电的有源配电网电压稳态指标计算研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(6):885-891.
- [3] 栗然, 范航, 张凡, 等. 基于拟蒙特卡洛的半不变量法概率潮流计算[J]. 电力建设, 2017, 38(11):144-150.
- [4] 赵真, 袁旭峰, 邹晓松, 等. 基于三点估计法的直流配电网中心概率潮流计算[J]. 现代电力, 2021, 38(1):1-7.
- [5] 柳永妍, 乐健, 高鹏, 等. 基于两点估计法的有源配电网概率潮流计算方法研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(5):1-8.
- [6] 鄂霖, 马振, 肖宇, 等. 直流配电网的三点估计概率潮流计算方法[J]. 分布式能源, 2021, 6(3):38-46.
- [7] 仇式鹏. 考虑新能源发电相关性的节点分析法概率潮流计算[D]. 南京:东南大学, 2016.
- [8] 许加柱, 贾龙涛, 李畅, 等. 考虑分布式电源相关性的配电网概率潮流计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(5):106-112.
- [9] 陈伟, 杨旭东, 裴喜平. 计及光伏出力相关性的改进半不变量法概率潮流计算方法[J]. 兰州理工大学学报, 2019, 45(4):79-85.
- [10] 高锋阳, 袁成, 李昭君, 等. 近似贝叶斯计算结合马尔科夫链蒙特卡洛的概率潮流计算[J]. 太阳能学报, 2021, 42(11):265-272.
- [11] 黄强, 张刘冬, 陈兵. 基于卷积的风速和负荷相关性分类处理的概率潮流计算[J]. 电测与仪表, 2018, 55(22):25-32.
- [12] 任洲洋, 颜伟, 项波, 等. 考虑光伏和负荷相关性的概率潮流计算[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24):181-187.
- [13] 缪鹏彬, 余娟, 史乐峰, 等. 基于改进非参数核密度估计和拉丁超立方抽样的电动公共客车负荷模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4):187-193.
- [14] 赵渊, 沈智健, 周念成, 等. 基于序贯仿真和非参数核密度估计的大电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6):14-19.
- [15] 李安乐, 田晶京, 赵峰, 等. 含光伏电源的配电网潮流计算[J]. 电测与仪表, 2020, 57(10):58-63.
- [16] 陈慧娜, 杨军, 高梦妍, 等. 基于改进前推回代的含分布式电源配电网潮流计算方法[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(6):6-11.
- [17] 杨晓萍, 王李瑾. 基于概率潮流的含分布式电源配电网优化[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8):71-76.
- [18] 赵来鑫, 赵书强, 胡永强. 考虑光伏发电相关性的概率潮流计算[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44(2):68-74.
- [19] 赵真, 袁旭峰, 徐玉韬, 等. 一种改进三点估计法的概率潮流计算方法[J]. 南方电网技术, 2020, 14(11):43-48.
- [20] 吴巍, 江可友, 李国杰. 计及光伏发电相关性的多重积分法概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3):568-575.
- [21] 席小青, 陆节涣, 庄广宇, 等. 快速 LDU 三角分解法的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(10):118-122.
- [22] 胡浩, 闫英敏, 陈永利. 基于 MATLAB 的电力系统潮流计算[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(12):55-59.

作者简介

刘会家, 副教授, 主要研究方向为高压电力设备在线监测、配电网规划与运行。

E-mail:lhj0928@foxmail.com

江旭旭, 硕士, 主要研究方向为电力系统概率潮流计算。

E-mail:1076827350@qq.com