

A Probabilistic Power Flow of Wind Integrated Power System Calculation Based on Measured Discrete Data

Xiaofeng Han¹, Peihong Yang¹, Lan Kang², Wenying Liu³, Yalong Li³

¹School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia

²School of Mining & Coal Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia

³State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing
Email: 1344538520@qq.com

Received: Jan. 27th, 2017; accepted: Feb. 14th, 2017; published: Feb. 17th, 2017

Abstract

With the increasing penetration of wind sources, using common probability density function to fit the probability distribution to compute the probabilistic load flow (PLF) will lead to considerable error. We propose PLF calculation method considering discrete distribution of input variables to calculate more realistic results. This method only needs wind power discrete sampling data combined with point estimate method of discrete variable function statistical moments and Gram-Charlier expand series, to estimate the statistical characteristics of the output of the random variable, such as the information of expectation, variance, cumulative distribution and so on. The effectiveness and practicality of the proposed method is verified using IEEE 39-bus system, and the results show that: the calculation method is not only faster, but also has high accuracy, and it has better engineering application prospects.

Keywords

Probabilistic Load Flow (PLF), Measured Data, Point Estimate Method, Cumulative Distribution, Wind Power

基于实测离散数据的含风电场电力系统概率潮流计算

韩小峰¹, 杨培宏¹, 亢 岚², 刘文颖³, 李亚龙³

¹内蒙古科技大学, 信息工程学院, 内蒙古 包头
²内蒙古科技大学, 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头
³新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京
Email: 1344538520@qq.com

收稿日期: 2017年1月27日; 录用日期: 2017年2月14日; 发布日期: 2017年2月17日

摘要

随着风电接入容量的增加, 利用常见的概率密度函数拟合其分布特征进行概率潮流(Probabilistic Load Flow, PLF)计算将产生较大误差, 提出一种考虑离散分布输入变量的PLF计算方法, 以期计算结果更符合实际情况。该方法仅需风电出力离散采样数据, 结合离散变量函数统计矩点估计法和Gram-Charlier展开级数, 便可估计出输出随机变量的统计特征, 如期望、方差、累积分布等信息。采用IEEE 39节点系统验证了所提方法的有效性和实用性, 结果表明: 该方法不仅计算速度快, 而且具有较高的精度, 工程应用前景较好。

关键词

概率潮流, 实测数据, 点估计法, 累积分布, 风电功率

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国风电渗透率的不断攀升和千万千瓦风电基地集群并网趋势的日益显著对电网运行带来了新的不确定性因素[1], 传统的潮流分析方法已无法全面反映含风电电力系统稳态运行的真实情况。概率潮流能够充分考虑系统中存在的各种不确定相关因素, 是分析含风电电力系统潮流分布并提供决策依据的有力工具, 是电网规划运行分析和评估的基础[2]。

自从 B. Borkowska 在 1974 年提出了概率潮流 PLF 的概念以来[3], 国内外广大学者对 PLF 算法展开了大量的研究工作。随着风电接入电网渗透率的不断提高, 针对含大规模风电场电力系统的概率潮流计算为近期研究的热点, 主要计算方法包括蒙特卡罗法[4] [5] [6] [7]、解析法[8] [9]以及点估计法[10] [11] [12] [13]。

蒙特卡罗法需要构建输入随机变量的累计分布函数, 通过大量取值、仿真计算可获得较为精确的计算结果, 但计算耗时长, 效率低; 同时, 由于风电场出力具有较强随机性和波动性, 难以给出确定的累计分布函数表达式, 采用常见的概率分布表达式存在较大误差。为此, 传统的蒙特卡罗法不适合处理含风电电力系统的 PLF。

解析法需要对潮流问题简化并将潮流方程线性化后进行卷积计算, 但简化会给计算结果带来误差, 且计算量随着随机输入变量的数量增加而增大, 不适合大规模系统分析。

点估计法由于其对随机系统分析简便有效而被受到广泛关注, 并且被成功的运用在 PLF 计算和其它不确定性问题的处理[14] [15], 该方法仅需要知道输入变量的前几阶矩即可进行 PLF 计算, 不需建立输入、输出间具体的函数表达式, 计算量小且精度高[16] [17]。

但现有点估计法的应用研究都是在输入随机变量分布已知的情况下且随机变量为连续变量的情形下实施的。而风电场输出功率实际数据采集均为离散变量，且实测数据表明，输出功率概率分布规律性不强，难以用简单的概率密度函数描述。所以，对含风电电力系统概率潮流计算，需要对点估计方法进行改进，使其既保持计算精度高、速度快等优点，又可以处理具备大量实测离散数据且概率分布难以用确定数学表达式描述的随机性工程实际问题，对实现快速准确评估含风电电力系统潮流运行特性具有重要的意义。

本文根据风电场实测离散数据，提出一种基于离散变量的函数统计矩点估计法，获得输出变量的期望、方差和低阶原点矩。然后，利用 Gream-Charlier 展开级数算法，近似逼近输出随机变量的累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)，得到一个更符合工程实用性的概率潮流算法。最后应用实际风电场实测数据并结合 IEEE39 节点仿真算例验证了所提方法的有效性和实用性。

2. 含风电的概率潮流建模

2.1. 离散变量函数统计矩点估计法

本文采用离散实测数据实现含风电的 PLF 计算，即随机输入变量为离散型变量。不失一般性，假设 X 为一输入随机变量， $Y = h(X)$ 是以 X 为变量的非线性函数。点估计法的核心思想是通过匹配函数 $h(X)$ 的前几阶矩，从而用 m 个概率集合来代替 $h(X)$ 。当随机变量 X 为 n 维随机变量时，点估计法则采用 $m \times n$ 个概率集合来取代联合概率密度，也就是一共采用了 $m \times n$ 个点进行估计。

根据样本逼近原理可知[18]，样本空间 (X_1, X_2, \dots, X_n) 中任一样本点 (x_1, x_2, \dots, x_n) 的数学期望和各阶中心距分别为：

$$\mu_{ix} = \frac{x_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{iN}}{N}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$M_{ik} = \frac{(x_{i1} - \mu_{ix})^k + (x_{i2} - \mu_{ix})^k + \dots + (x_{iN} - \mu_{ix})^k}{N} \quad (2)$$

$$k = 1, 2, \dots, m$$

其中 m 为点估计数。

在均值点 μ_i 处对 $h(X)$ 展开泰勒级数，有

$$Y = h(\mu_{ix}) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k!} \frac{\partial^{(k)}}{\partial x} h(\mu_{ix}) (x_i - \mu_i)^k \quad (3)$$

则 Y 的数学期望可表示为：

$$E(Y) = h(\mu_{ix}) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k!} \left[\frac{\partial^k h(\mu_{ix})}{\partial x} \right] M_{ik}(x) \quad (4)$$

$$i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, 2m-1$$

设从 n 维随机变量 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 中提取 m 个离散状态值，即估计点 x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$) 并与其他变量的均值一起构成了点估计组为 $(\mu_{1x}, \mu_{2x}, \dots, x_{ij}, \dots, \mu_{(n-1)x}, \mu_{nx})$ ，每一组估计点对应的权重为 P_{ij} ，且每个随机变量的权重均等，即

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m p_{ij} = \frac{1}{n} \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

若 x_{ij} 满足

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (x_{ij} - \mu_{ix})^k = M_{ik} \quad (6)$$

则由 x_{ij} 及 P_{ij} 可以完全匹配输出随机变量的数学期望

$$E(Y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} h(\mu_{1x}, \dots, x_{ij}, \dots, \mu_{(n-1)x}, \mu_{nx}) + h^k(\cdot) \quad (7)$$

式中, $h^k(\cdot)$ ($k = 2m, 2m+1, \dots, \infty$) 为高阶泰勒级数展开项, 忽略高阶项, 即可得到输出变量的期望值:

$$E(Y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} h(\mu_{1x}, \dots, x_{ij}, \dots, \mu_{(n-1)x}, \mu_{nx}) \quad (8)$$

根据同样的方法可以得出 Y 的 m 阶距, 即

$$E(Y^m) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} h(\mu_{1x}, \dots, x_{ij}, \dots, \mu_{(n-1)x}, \mu_{nx})^m \quad (9)$$

公式(3)-(9)推到过程详见文献[19] [20]。

2.2. 基于 Gram-Charlier 展开级数逼近累积分布

根据上文提出的点估计法可以得到含风电场随机变量的期望、方差和有限阶原点矩等统计信息, 为了获得输出变量的分布函数特性, 以满足实际工程问题, 本文采用 Gram-Charlier 展开级数[21], 采用 Gram-Charlier 展开级数可以精确的逼近随机变量的 CDF, 具体逼近过程如下:

对任意一个随机变量 ξ , 假设其均值和标准差分别为 μ 和 δ , 标准化后, 随机变量为:

$$c = (x - m) / d \quad (10)$$

则通过 Gram-Charlier 展开级数求得 χ 的概率密度函数 $\Psi(\chi)$ 和累计分布函数 $\Phi(\chi)$ 分别为:

$$\psi(\chi) = \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{i!} \phi^{(i)}(\chi) = \phi(\chi) + \frac{C_1 \phi^{(1)}(\chi)}{1!} = \frac{C_2 \phi^{(2)}(\chi)}{2!} + \frac{C_3 \phi^{(3)}(\chi)}{3!} + \dots \quad (11)$$

$$\Psi(\chi) = \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{i!} \Phi^{(i)}(\chi) = \Phi(\chi) + \frac{C_1 \Phi^{(1)}(\chi)}{1!} = \frac{C_2 \Phi^{(2)}(\chi)}{2!} + \frac{C_3 \Phi^{(3)}(\chi)}{3!} + \dots \quad (12)$$

式中, $\phi(\chi)$ 和 $\Phi(\chi)$ 分别为 $\mu = 0, \delta = 1$ 的标准正态分布概率密度函数和累计分布函数; C_i 为系数, 即

$$C_i = (-1)^i \int_{-\infty}^{+\infty} H_i(\chi) \psi(\chi) d\chi \quad i = 1, 2, \dots \quad (13)$$

其中, 系数 H_i 为 Hermite 多项式

$$H_i(\chi) = \frac{\phi^{(i)}(\chi)}{\phi(\chi)} \quad i = 1, 2, \dots \quad (14)$$

文献[22]表明, 在实际问题处理中, 选取 3~9 阶 Gram-Charlier 展开级数逼近, 能得到较好的逼近效果, 采用更高阶逼近其效国不一定比低阶逼近好。为此, 本文采用 6 阶 Gram-Charlier 展开级数逼近, 具体效果见后文算例分析。

3. 算例分析

3.1. 仿真系统

为了验证本文所提方法的有效性, 采用 IEEE 39 节点系统算例在 MATLAB 平台下进行仿真测试。

IEEE 39 节点系统包括 10 台发电机和 39 个节点，代表了美国新英格兰州的一个 345 kV 电网[23]，其拓扑结构如图 1 所示。

选取节点 31 为平衡节点，并将节点 34 处的同步发电机替换为由双馈感应式风力发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)组成的风电场。选择在节点 34 处连接风电场，主要考虑了与未接入风电场时电网的功率匹配，未接入风电场时节点 34 处的功率出力为 508 MW 且设为 PV 节点。而本文所获实测数据风电场(包括 330 台 1.5 MW 的 DFIG)的额定出力为 495 MW，与未接入风电场时母线 34 的出力接近，同时考虑到 DFIG 机组自身具有无功调节能力，本文也将其设 PV 节点。计算过程中系统基准功率设为 100 MVA。

所用数据为某风场 2016 年 3 月 1 日~2016 年 5 月 31 日每小时有功出力实测数据，其有功功率输出概率分布特性如图 2 所示：

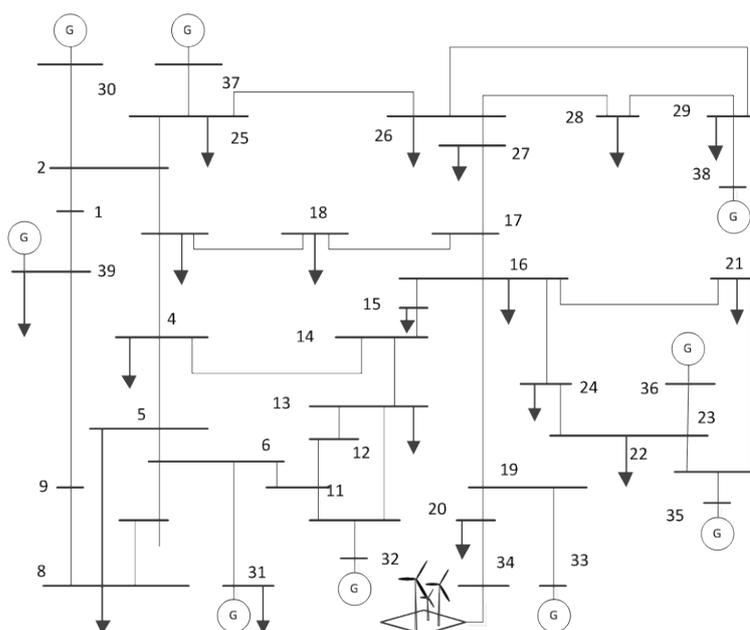


Figure 1. Diagram of IEEE 39-bus test system
图 1. IEEE 39 节点测试系统接线图

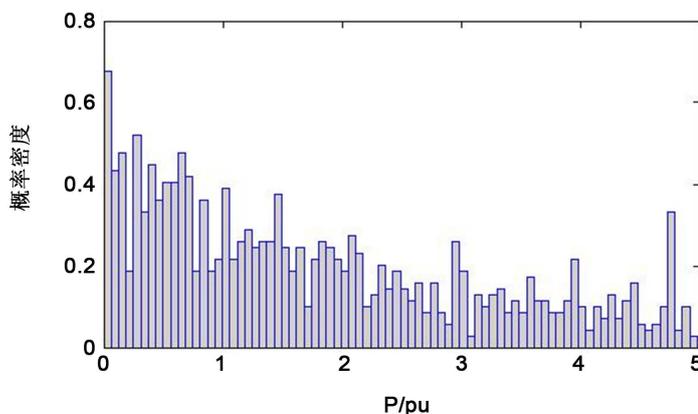


Figure 2. Probability distribution of active output for wind farm
图 2. 风电场有功出力的概率分布

从图 2 中可以看出，风电场输出功率概率分布缺乏一定的规律性，若用常见的概率密度函数拟合，会给计算结果带来一定的误差。

3.2. 计算结果

本文提出相对误差指标验证所提方法的有效性及其计算精度，取点估计法求出的输出变量统计特征值为 ω_1 ，采用全部实测样本数据计算得到统计特征值为 ω_2 ，则相对误差：

$$\varepsilon = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2} \times 100\% \quad (15)$$

用所有样本点数据进行潮流计算，计算时间仅 0.23 s，计算速度快。得出了平衡节点有功、无功的统计特征如表 1 所示。同时，表 1 也给出利用点估计法的统计结果。

从表 1 可以看出，通过与样本数据的大量计算对比，点估计法的统计结果误差总体较小，计算精度高，且无功功率在 6 阶矩下的误差有所下降，能够满足工程要求。

针对表 1 的计算结果，对平衡节点的有功功率和无功功率分别进行 Gram-Charlier 展开，并将所得累积分布与样本点的计算结果对比，如图 3 和图 4 所示。

图 3 和图 4 可以看出，采用本文所提算法获得的累积分布曲线与基于采样数据进行大量计算的结果基本吻合，且无功功率的吻合程度较好。上述结果也验证了利用 Gram-Charlier 级数展开的方法是可行的。

为了进一步验证本文所提方法在含风电电力系统概率潮流计算的适用性，接下来对 IEEE 39 节点网络中电压的分布情况进行统计分析，以节点 8 为例，具体计算的统计特征结果如表 2 所示。

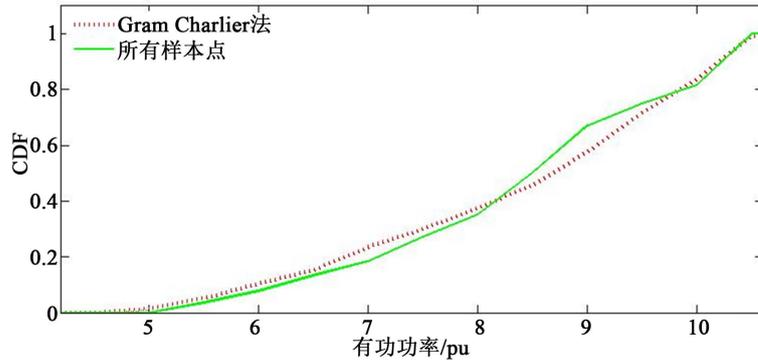


Figure 3. Cumulative distributions of the active power at balance bus
图 3. 平衡节点有功功率累积分布

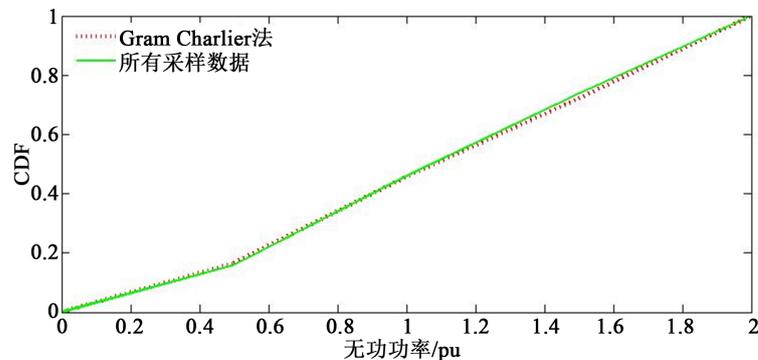


Figure 4. Cumulative distributions of the reactive power at balance bus
图 4. 平衡节点无功功率累积分布

Table 1. Statistical characteristics of active and reactive power at balance bus
表 1. 平衡节点有功、无功功率统计特征

		期望	2 阶矩	3 阶矩	4 阶矩	5 阶矩	6 阶矩	标准差
有功功率	所有采样数据	8.425	72.984	647.298	5855.797	53,860.126	502,304.374	1.415
	点估计法	8.417	72.981	647.288	5855.764	53,783.839	501,354.267	1.412
	相对误差	0.0950	0.0041	0.0015	0.0006	0.1416	0.1891	0.2120
无功功率	所有采样数据	1.084	1.443	2.131	3.347	5.461	9.138	0.516
	点估计法	1.079	1.389	2.017	3.220	5.103	8.989	0.515
	相对误差	0.4613	3.7422	5.3496	3.7944	6.5556	1.6306	0.1938

Table 2. Statistical characteristics of voltage and phase angle at load bus 8
表 2. 负荷节点 8 电压、相角统计特征

		期望	2 阶矩	3 阶矩	4 阶矩	5 阶矩	6 阶矩	标准差
电压幅值	所有采样数据	0.919	0.845	0.777	0.713	0.656	0.603	0.058
	点估计法	0.919	0.845	0.777	0.714	0.656	0.603	0.059
	相对误差	0	0	0	-0.14	0	0	-1.695
电压相角	所有采样数据	17.557	314.483	5735.1	106,280	1,997,600	38,023,000	1.581
	点估计法	17.541	313.866	5717.3	105,820	1,986,300	37,757,000	1.579
	相对误差	0.0911	0.1962	0.3104	0.4328	0.5657	0.6996	0.1265

针对表 2 的计算结果，利用 Gram-Charlier 展开可得到节点 8 电压和相角的累积分布，具体见图 5 和图 6。

由图 5 和图 6 可知，节点 8 的电压和相角累积分布曲线情况与平衡节点的有功、无功功率一致，这也充分说明了本文所提出的点估计法在处理离散实测数据的可行性，能够利用风电场大量实测数据分析其对电力系统潮流分布的影响程度。为含大规模风电场电力系统潮流算法提供理论基础，为含大规模风电场电力系统潮流计算提供技术支持，也为大规模风电场的建设规划提供指导与参考。

4. 结论

本文根据实际风电场的实测离散数据进行电力系统 PLF 计算，能够更切合风电场实际运行情况，对快速评估含风电电力系统潮流运行特性及风电场规划、并网具有一定的指导作用，对评估含风电电力系统安全稳定具有重要意义，具体结论如下：

1) 取 3 个月每小时的有功功率出力实测数据，计算了大量采样数据下其有功功率输出的概率分布特性，计算结果表明了输出的概率分布特性规律性不强，指出了采用常用的 PDF 描述得到的计算值与实际值存在着一定的误差，进而影响计算结果的指导意义。

2) 根据实测样本数据，利用离散变量函数统计矩点估计法并结合 Gram-Charlier 展开级数，建立了 PLF 计算模型，该方法不需要知道风电场输出有功功率出力的概率密度函数，仅根据实测样本数据便可获得输出变量的统计特征信息，且保留潮流计算的非线性特性。IEEE 39 节点算例的计算结果表明，该方法不仅计算速度快，且计算精度也高，能满足实际工程需求，具有较好的工程实用价值。

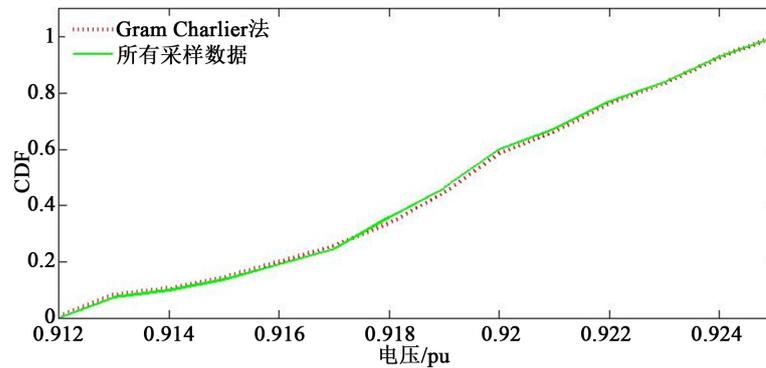


Figure 5. Cumulative distributions of the voltage at bus 8

图 5. 节点 8 电压累积分布

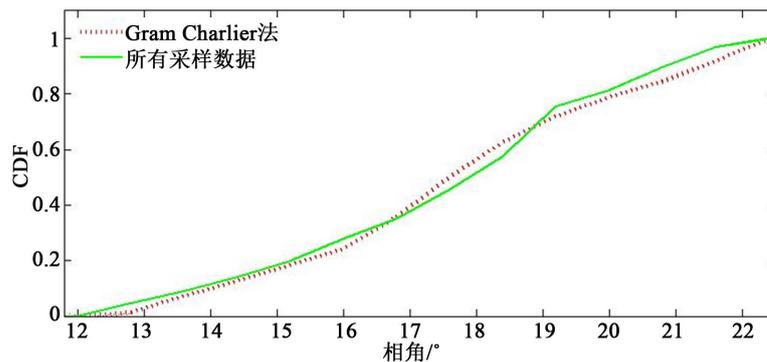


Figure 6. Cumulative distributions of the phase angle at bus 8

图 6. 节点 8 相角累积分布

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51377053)。

参考文献 (References)

- [1] 郑伟, 何世恩, 智勇, 等. 大型风电基地的发展特点探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 57-61.
- [2] Usaola, J. (2010) Probabilistic Load Flow with Correlated Wind Power Injections. *Electric Power Systems Research*, **80**, 528-536. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2009.10.023>
- [3] Borkowska, B. (1974) Probabilistic Load Flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **93**, 752-759. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1974.293973>
- [4] Yu, H., Chung, C.Y., Wong, K.P., et al. (2009) Probabilistic Load Flow Evaluation with Hybrid Latin Hypercube Sampling and Cholesky Decomposition. *IEEE Transactions on Power Systems*, **24**, 661-667. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2016589>
- [5] 方斯顿, 程浩忠, 宋越, 等. 考虑风电相关性的电力系统随机无功备用优化[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 32-38.
- [6] 李俊芳, 张步涵. 基于进化算法改进拉丁超立方抽样的概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 90-96.
- [7] 熊强, 陈维荣, 张雪霞, 等. 考虑多风电场相关性的场景概率潮流计算[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2154-2159.
- [8] 石东源, 蔡德福, 陈金富, 等. 计及输入变量相关性的半不变量法概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 104-114.
- [9] Zhang, P. and Lee, S.T. (2004) Probabilistic Load Flow Computation Using the Method of Combined Cumulants and Gram-Charlier Expansion. *IEEE Transactions on Power Systems*, **19**, 676-682.

<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.818743>

- [10] Morales, J.M. and Perez-Ruiz, J. (2007) Point Estimate Schemes to Solve the Probabilistic Power Flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, **22**, 1594-1601. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2007.907515>
- [11] 李一铭, 李文沅, 颜伟. 考虑风速有界性的概率潮流点估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1606-1612.
- [12] Nogueira, R. (2015) PinheiroInterior-Exterior Point Method with Global Convergence Strategy for Solving the Reactive Optimal Power Flow Problem. *Electric Power and Energy Systems*, **66**, 235-246. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.10.003>
- [13] 吴巍, 汪可友, 韩蓓, 李国杰. 基于 Pair Copula 的随机潮流三点估计法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 121-128.
- [14] 杨慧敏, 易海琼, 文劲宇, 程时杰. 一种实用的大电网低频振荡概率稳定性分析方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 124-129.
- [15] 韩海腾, 高山, 吴晨, 等. 基于 Nataf 变换的电网不确定性多点估计法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 28-34.
- [16] Mohseni-Bonab, S., Rabiee, A., Mohammadi-Ivatloo, B., Jalilzadeh, S. and Nojavan, S. (2016) A Two-Point Estimate Method for Uncertainty Modeling in Multi-Objective Optimal Reactive Power Dispatch Problem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **75**, 194-112. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.08.009>
- [17] Lin, Z. and Li, W. (2013) Restrictions of Point Estimate Methods and Remedy. *Reliability Engineering and System Safety*, **111**, 106-111. <https://doi.org/10.1016/j.res.2012.10.016>
- [18] Rahman, S. and Xu, H. (2004) A Univariate Dimension-Reduction Method for Multi-Dimensional Integration in Stochastic Mechanics. *Probabilistic Engineering Mechanics*, **19**, 393-408. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2004.04.003>
- [19] Hong, H.P. (1998) An Efficient Point Estimate Method for Probabilistic Analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, **59**, 261-267. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(97\)00071-9](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(97)00071-9)
- [20] 范文亮, 杨朋超, 李正良. 涉及离散变量的函数统计矩点估计法[J]. 工程力学, 2014, 31(10): 8-13.
- [21] 艾小猛, 文劲宇, 吴桐, 孙树敏, 李广磊. 基于点估计法和 Gram-Charlier 展开的含风电电力系统概率潮流实用算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 16-25.
- [22] Pei, Z. and Lee, S.T. (2004) Probabilistic Load Flow Computation Using the Method of Combined Cumulants and Gram-Charlier Expansion. *IEEE Transactions on Power Systems*, **19**, 676-682. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.818743>
- [23] Pai, M. (1989) *Energy Function Analysis for Power System Stability*. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1635-0>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: se@hanspub.org