

文章编号: 2095-4980(2025)07-0699-12

基于信息物理融合的有源配电网概率潮流计算

梁 铃¹, 姬 源¹, 黄育松¹, 覃 海¹, 代 江¹, 张云菊¹, 郭 明¹, 石启宏¹, 陈 飞²

(1. 贵州电网公司电力调度控制中心, 贵州 贵阳 550002; 2. 上海交通大学 电气工程学院, 上海市 200240)

摘 要: 随着城市电气化和可再生能源技术的发展, 分布式电源在配电系统中发挥着重要作用, 但其随机波动性和不确定性对系统的智能化调控和稳定性提出了挑战。为此, 本文基于数智化能源互联网的信息物理系统(CPS)融合理念, 提出一种新的概率潮流计算方法。该方法通过构建信息物理融合模型, 利用传感与计算的协同机制全面感知系统动态运行, 考虑分布式电源发电的随机波动性, 构建了风力和光伏发电的出力概率模型, 并运用 Copula 理论建立了风光电场出力相关性的联合模型。此外, 提出了基于高斯混合模型的负荷概率特性分析方法, 并在此基础上, 采用概率密度演化方程, 通过有限差分法实现高效求解, 从而开发出一套面向数智化能源系统的概率潮流计算方法。该方法为分布式电源主导的配电系统提供了精准、高效的计算途径, 助力数智化能源系统的安全、稳定 and 智能运行。

关键词: 分布式电源; 信息物理; 数智化; 概率潮流计算; Copula 理论; 概率密度演化方程**中图分类号:** TM72; TN711**文献标志码:** A**DOI:** 10.11805/TKYDA2025013

Probabilistic Load Flow calculation of active distribution network based on cyber-physical fusion

LIANG Ling¹, JI Yuan¹, HUANG Yusong¹, QIN Hai¹, DAI Jiang¹, ZHANG Yunju¹,
GUO Ming¹, SHI Qihong¹, CHEN Fei²

(1. Power Dispatch and Control Center of Guizhou Power Grid Company Ltd., Guiyang Guizhou 550002, China;

2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the development of urban electrification and renewable energy technologies, distributed power sources play an important role in distribution systems, but their random volatility and uncertainty bring challenges to system stability. To solve this problem, this paper proposes a new Probabilistic Load Flow(PLF) calculation method based on the concept of Cyber-Physical System(CPS) integration. This method comprehensively perceives the dynamic operation of the system through the CPS fusion model, takes into account the random volatility of distributed power generation, constructs the output probability model of wind and photovoltaic power generation, and uses the Copula theory to establish a joint model of the output correlation of wind and photovoltaic power plants. In addition, a Gaussian mixture model is proposed to reveal the probabilistic characteristics of the load. On this basis, a new probabilistic power flow calculation method is proposed by adopting the probability density evolution equation and using the finite difference method for efficient solution. This method provides an accurate and efficient calculation approach for power distribution systems considering distributed generation, which helps to ensure the safe and stable operation of the system.

收稿日期: 2025-01-10; 修回日期: 2025-02-27

基金项目: 贵州电网公司科技资助项目(066500KK52222046)

引用格式: 梁铃, 姬源, 黄育松, 等. 基于信息物理融合的有源配电网概率潮流计算[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(7): 699-710. DOI: 10.11805/TKYDA2025013.

Citation format: LIANG Ling, JI Yuan, HUANG Yusong, et al. Probabilistic Load Flow calculation of active distribution network based on cyber-physical fusion[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(7): 699-710. DOI: 10.11805/TKYDA2025013.

Keywords: distributed power generation; cyber-physical; digital intelligence; Probabilistic Load Flow(PLF) calculation; Copula theory; probability density evolution equation

随着社会生活水平的提高和电力消费模式的多样化, 公众对电力的需求和消耗持续增长^[1]。分布式能源已成为数智化能源互联网的关键组成部分, 对于优化能源结构和实现智能能源管理至关重要。随着光伏、风力等分布式发电(Distributed Generation, DG)技术的普及, 配电系统中出力分布的随机性和波动性愈发显著, 这无疑给电网的安全、规划和电能质量带来了更严峻的考验^[2-4]。信息物理系统(CPS)的引入, 为构建智能化、动态化和自适应的数智化能源互联网提供了全新的解决方案。CPS通过传感器网络对物理环境进行实时感知, 将分布式电源的输出、电压波动等物理量转化为信息流, 并通过智能算法进行处理和反馈, 从而形成物理系统与信息系统的闭环控制。这一框架精准刻画了配电系统的时变运行场景, 使系统能够动态响应分布式电源的波动性, 并实现智能化调控。概率潮流(PLF)计算作为一种能够反映电力系统中各种因素随机变化对系统运行影响的方法, 对于数智化能源系统的安全、高效运行以及优化管理具有重要意义。

自 20 世纪 70 年代美国学者 Borkowska 提出概率潮流概念以来, 该方法在电力系统潮流分析中得到了广泛应用, 并随着科技进步不断发展。文献[5]运用拉丁超立方采样法和 Cholesky 分解技术, 实现了高精度的相关性样本采集和概率潮流计算, 但计算效率随系统规模呈指数增长, 难以满足实时性需求。文献[6]引入改进的拉丁超立方采样和 Copula 理论, 建立了输入随机变量相关性的概率模型, 并结合 Kendall 秩相关系数进行确定性潮流计算。文献[7]基于半不变量法(Cumulant Method, CM), 通过 Cornish-Fisher 级数展开简化卷积运算, 但其忽略风-光出力与负荷间的相关性, 导致高渗透率 DG 场景下误差累积。文献[8]分析了分布式发电对配电网的影响, 并建立了光伏阵列和风电场的概率模型, 通过有限采样点近似概率分布, 但难以捕捉多峰分布特性, 尤其在高斯混合负荷场景中精确度受限。文献[9]提出一种改进的分布式光伏瞬时发电模型, 并将其用于概率潮流模拟。

现有方法多依赖静态概率模型, 难以动态响应时变运行场景, 且缺乏信息物理系统的闭环反馈机制, 限制了其在数智化能源互联网中的实用性。本文从数智化配电网的视角出发, 基于 CPS 融合思想, 将分布式电源的输出、电压波动等物理量转化为信息流, 并通过智能算法进行处理和反馈, 从而形成了物理系统与信息系统的闭环控制。通过捕捉系统中的关键时变特性, 运用 Copula 理论对分布式电源出力的相关性进行建模, 建立风-光-负荷联合出力的概率模型, 并提出基于高斯混合分布的负荷功率概率模型^[10-13]。通过对不同时间尺度的场景跟踪因子进行动态调整, 实现了对系统动态特性的精确模拟和潮流计算。在此基础上, 本文基于概率守恒原则, 利用概率密度演化方程(Probability Density Evolution Equation, PDEE)提出一种概率潮流计算的新方法, 并采用有限差分法进行求解。在对 IEEE 34 节点配电系统进行仿真验证时, 本文方法不仅显著提高了计算的精确度与效率, 还能动态响应分布式电源的波动特性, 为数智化能源互联网下的大规模分布式能源接入与协同优化提供了理论支撑和实践参考。

1 概率潮流计算

1.1 概率潮流方法现状

概率潮流计算技术已广泛用于电力系统潮流分析领域。当前, 学术界和工业界普遍认可的 3 种主要概率潮流计算技术分别为: 点估计近似法、半不变量解析法以及蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)模拟法^[14]。近似法的优势在于它不需要确立输入与输出变量之间的精确数学关系, 操作较为简便, 且计算负担相对较轻, 但精确度相对较低, 尤其是在处理复杂非线性系统时, 结果可能会偏离实际情况; 同时也存在适用范围受限、对模型依赖性强、处理变量相关性能力弱以及可能忽视极端事件的缺点。解析法计算侧重于通过分析随机变量之间的相互作用, 执行卷积运算以确定状态变量的概率分布, 其关键在于高效处理卷积运算的复杂性^[15]。目前卷积运算多采用傅里叶快速算法、序列运算理论、CM 等。解析法在处理卷积运算时, 假设输入变量彼此独立, 因此在应对输入变量间的相互关系时, 这种方法固有的缺陷就显现出来了。其适用性和精确度常受电力系统模型复杂度以及各种不确定性因素的影响。蒙特卡罗模拟通过从随机变量的概率分布中抽取样本^[16]进行多次仿真来估计系统状态的统计特性, 其主要优点是能够处理复杂的系统和多种不确定性因素, 精确度随样本数量的增加而提高。但增加样本量会显著增加计算时间, 尤其在系统规模较大时, 计算需求也会随之增加。

1.2 配电系统随机因素的概率模型

1.2.1 风力发电概率模型

风力发电利用风能驱动风电机组发电, 其出力大小取决于风速。由于风速受多种自然因素影响, 存在不可

预测性, 故常用概率分布表征其变化特性。目前, 威布尔分布是业界普遍接受并用于描述风速变化的标准概率模型, 其表达式为:

$$f_w(v) = \frac{k}{c} \times \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

式中: k 为威布尔分布的尺度参数; c 为形状参数; v 为风速。这些参数共同决定了风速分布的具体形态。

威布尔分布的尺度参数 c 和形状参数 k 的估算通常依赖于实际测量的风速数据。常见的估算方法包括贝叶斯估计法、均值方差法和矩估计法等^[17]。采用均值方差法估计威布尔分布的 2 个参数 k 和 c :

$$\begin{cases} k = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^{-1.086} \\ c = \frac{\mu}{\Gamma(1+1/k)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ 为风速标准差; Γ 为伽马函数; μ 为风速均值。

风力发电机组的出力功率与风速的大小息息相关, 如图 1 所示, 风速 v 与风力发电机功率 P_{wd} 之间的关系为:

$$P_{wd} = \begin{cases} 0, & v < v_{ci}, v > v_{co} \\ k_1 v + k_2, & v_{ci} < v < v_r \\ P_r, & v_r < v < v_{co} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_r 为额定功率; v_{ci} 、 v_{co} 和 v_r 分别为风机的切入、切出和额定风速; k_1 、 k_2 为威布尔分布的位置参数。

$$k_1 = P_r / (v_r - v_{ci}); k_2 = -k_1 v_{ci} \quad (4)$$

1.2.2 光伏发电概率模型

对光伏发电出力效率影响最大的要素是光照强度, 其固有的随机性和随时间变化的特性是造成光伏发电输出不稳定的主要原因。本文采用贝塔分布描述光照强度概率模型特性:

$$f(r) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (5)$$

式中 r 、 $r_{\max}$ 分别为光照强度及其最大值; α 、 β 为贝塔分布的形状参数。

通过光强均值 μ 与标准差 σ , 可得 α 、 β 为:

$$\begin{cases} \alpha = \mu \left[\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1 \right] \\ \beta = (1-\mu) \left[\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1 \right] \end{cases} \quad (6)$$

分布式光伏发电的概率密度函数为:

$$P_{\text{solam}} = r_{\max} A \eta \quad (7)$$

式中: A 为实时的光照辐射度; η 为光电转换效率。

1.2.3 风力-光伏联合出力模型

由于相邻位置的风力涡轮机和光伏板出力相关, 本文采用一种累加模型模拟风电场和光伏电站的总出力。邻近的发电场间关系复杂, 且这种关系会随不同的气象条件而变化, 为描述这种联合出力的概率分布, 选取 Frank-Copula 函数作为连接函数^[18], 其密度函数表达式为:

$$c_F(u, v; \theta) = \frac{-\theta(e^{-\theta} - 1)e^{-\theta(u+v)}}{[(e^{-\theta} - 1) + (e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)]^2} \quad (8)$$

式中 θ 为随机变量 u 、 v 的相关参数, 且 $\theta \neq 0$ 。

相关系数 τ 与相关参数 θ 之间的关系为:

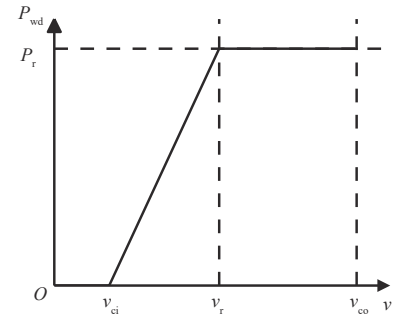


Fig.1 Output curve of wind turbine
图 1 风力机组出力曲线

$$\tau = 1 + \frac{4}{\theta} [D_k(\theta) - 1] \quad (9)$$

式中 $D_k(\theta) = \frac{k}{\theta^k} \int_0^\theta \frac{t^k}{e^t - 1} dt$, $k=1$ 时为德拜函数。

由式(8)和式(9)可得出风力发电和光伏发电联合出力的密度函数为:

$$f(p_w, p_v) = \frac{-\theta(e^{-\theta} - 1)e^{-\theta(F(p_w) + F(p_v))} f(p_w) f(p_v)}{[(e^{-\theta} - 1) + (e^{-\theta F(p_w)} - 1)(e^{-\theta F(p_v)} - 1)]^2} \quad (10)$$

式中: $F(p_w)$ 、 $f(p_w)$ 为风力发电机组有功功率的分布函数和概率密度函数; $F(p_v)$ 、 $f(p_v)$ 为光伏发电机组有功出力的分布函数和概率密度函数。

1.2.4 负荷概率模型

由于用户多样化的生活方式和用电习惯, 电力系统面临的负荷需求呈现出显著的不确定性和波动性。大量研究和专家分析表明, 负荷的概率模型通常可近似为正态分布^[19]:

$$\begin{cases} f(P_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{P_L}} \exp\left[-\frac{(P_L - \mu_{P_L})^2}{2\sigma_{P_L}^2}\right] \\ f(Q_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Q_L}} \exp\left[-\frac{(Q_L - \mu_{Q_L})^2}{2\sigma_{Q_L}^2}\right] \end{cases} \quad (11)$$

式中: σ_{P_L} 为有功功率(P_L)的标准差; σ_{Q_L} 为无功功率(Q_L)的标准差; μ_{P_L} 、 μ_{Q_L} 分别为有功功率和无功功率的均值。

在配电系统中, 节点负荷种类繁多, 区域间的负荷大小和变化模式存在显著差异, 负荷特征复杂多变。单个高斯分布无法精准描绘这些复杂多变的负荷特性^[20], 因此本文采纳了高斯混合模型, 该模型由多个高斯分布构成, 其概率密度函数为:

$$f(x) = \sum_{k=1}^k p(k) p(x|k) = \sum_{k=1}^k \omega_k N(x|\mu_k, \sigma_k) \quad (12)$$

式中: $p(k)=\omega_k$ 表示第 k 个高斯模型占整个模型的权重; $p(x|k)=N(x|\mu_k, \sigma_k)$ 表示第 k 个高斯模型的概率密度函数。

2 配电系统时变运行场景的信息物理融合

2.1 潮流计算基本方程

由于配电系统中接入的分布式电源具有间歇性和随机波动特性, 因此必须对其时变的运行状态进行有效建模。为定量感知配电网的运行状态, 引入信息跟踪因子, 并利用该因子进行不平衡功率的分配分析。为捕捉分布式电源输出功率的长期趋势变化, 采用平滑移动平均线(Exponential Moving Average, EMA)作为统计指标进行描述:

$$I_{EMA}^{(t)} = I_{EMA}^{(t-1)} + \sigma(P_{DG}^{(t)} - I_{EMA}^{(t-1)}) \quad (13)$$

式中: I_{EMA} 为平滑移动平均线指标; $P_{DG}^{(t)}$ 表示当前时刻分布式电源的有功功率输出值; σ 为平滑系数, 根据研究时间尺度不同而变化, 如式(14)所示, 其中 T 为周期。

$$\sigma = \frac{2}{T+1} \quad (14)$$

在不同的研究时间尺度下, 可选择适当的平滑系数计算和分析分布式电源的平滑移动平均线指标, 从而反映不同时间尺度下输出功率的变化速率。以 10 s 和 30 s 为周期定义平滑移动平均线时, 对应的平滑系数分别为 0.181 8 和 0.064 5。根据式(15), 可以计算出两条不同周期平滑移动平均线之间的差值(Difference, DIF), 以 V_{DIF} 表示。在进行比较时, 需使用相同时间点的 EMA 值进行分析。

$$V_{DIF}^{(t)} = I_{EMA, T=10}^{(t)} - I_{EMA, T=30}^{(t)} \quad (15)$$

通过实际运行数据, 可实时绘制 DIF, 并在每个时间点上生成对应的曲线切线。DIF 的符号以及切线斜率的变化具有不同的物理含义, 这些变化形成不同的状态组合, 反映出风电电源输出功率波动的不同特征, 如表 1 所示。

Table1 The state combination composed by different values of V_{DIF} and the positive or negative properties of tangent		
indicator status	$dV_{DIF}^0/dt > 0$	$dV_{DIF}^0/dt \leq 0$
$V_{DIF} > 0$	The output power of distributed power sources is in a monotonically increasing trend over a certain period of time.	The output power of distributed power generation is in a relatively high fluctuation adjustment range.
$V_{DIF} < 0$	The output power of distributed power generation is in a relatively low fluctuation adjustment range.	The output power of distributed power sources is in a monotonically decreasing trend over a certain period of time.

在配电网中，针对可控储能电源，应充分利用其双向充放电特性，在功率和速率的限制下提供支撑，尽可能抑制功率波动，进而增强分布式电源的稳定性。因此，储能功率需根据 DIF 的实时状态和变化趋势进行动态调整。当系统检测到 DIF 发生变化时，储能输出将立即作出相应的调整。

2.2 分配不平衡功率的储能调节机制

假设配电系统中接入了 M 个分布式电源和 K 个型号相同、参数一致的储能设备。根据式(16)计算每个分布式电源与各储能设备之间的电气距离。为减少远距离传输损耗，每个分布式电源应分配给距离最近的储能设备，以平衡功率波动。

$$D_{k,i} = \sum_{h \in C} R_h + jX_h$$

(16)

式中： $D_{k,i}$ 为第 k 个分布式电源到第 i 个储能设备的电气距离； C 为连接分布式电源并网点与储能节点的导线集合； R 和 X 分别代表电阻和电抗。

根据表 1 中不同时间尺度的 DIF 及其切线正负性，可反映电源输出功率变化趋势，并据此调节储能设备的输出功率。具体而言，在稳态下，通过配电系统的潮流分布和分布式电源的出力信息，建立储能的有功功率输出模型。该模型采用分段折线形式，正值表示放电，负值表示充电，并根据运行场景的动态变化进行连续调整。

$$P_{ESS}(t) = P(t_0) + kt$$

(17)

式中： $P(t_0)$ 为当前折线段的初值； k 为折线段斜率，其绝对值不得超过储能设备的最大充放电倍率。图 2 展示了储能输出功率如何根据场景变化因子进行调整。DIF 曲线使用不同区段的余弦函数表示，储能输出与 DIF 曲线所示状态保持一致。

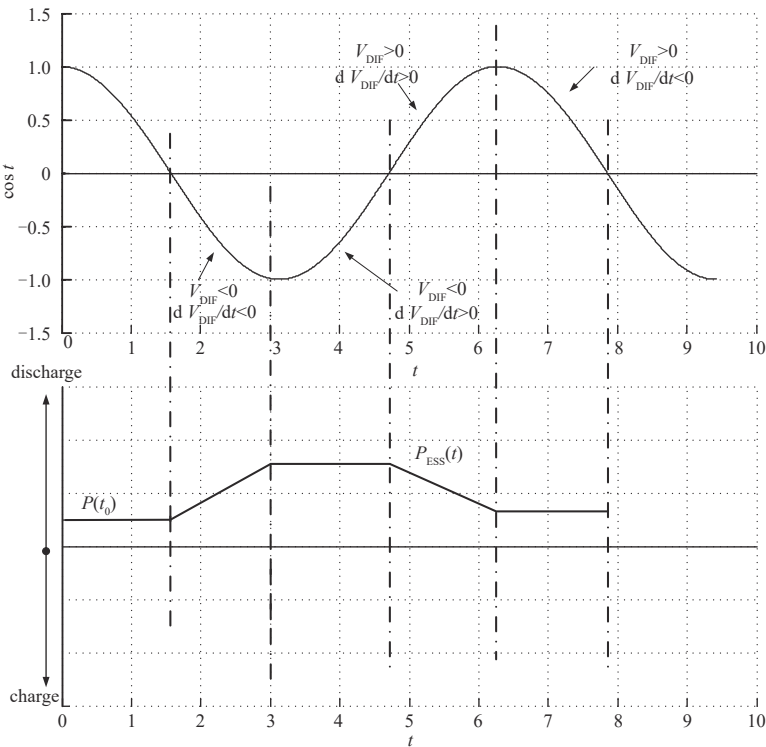


Fig.2 The output power curve of ESS according to the variation of tracking indicator
图 2 根据场景变化跟踪因子的储能输出机制

2.3 时变运行场景分析的信息物理融合机理

在信息化和智能化条件下,主动配电网的时变运行场景如图3所示,涵盖了从场景变化跟踪到可控设备调节的全过程。该过程主要包括:感知并跟踪分布式电源输出功率的变化,计算平滑移动平均线,判断DIF状态变化,调节储能输出。信息系统会感知每一时刻的风电功率和其他网络环境物理量,并将这些数据转换为信息量,传输至智能终端或配电主站处。有限状态机描述了间歇性电源输出的动态,信息系统通过复杂处理和分析生成控制命令,协调控制系统将其作用于储能设备,最终影响配电网的运行。在这一过程中,信息流动的感知、分析和决策执行与物理电网的动态过程相对应,其精确性、可靠性和同步性对运行场景分析和潮流计算至关重要。因此,信息系统需具备高精度度、可靠性和安全性,而物理层面则需同时满足网络安全性、储能能量约束和充放电倍率约束。

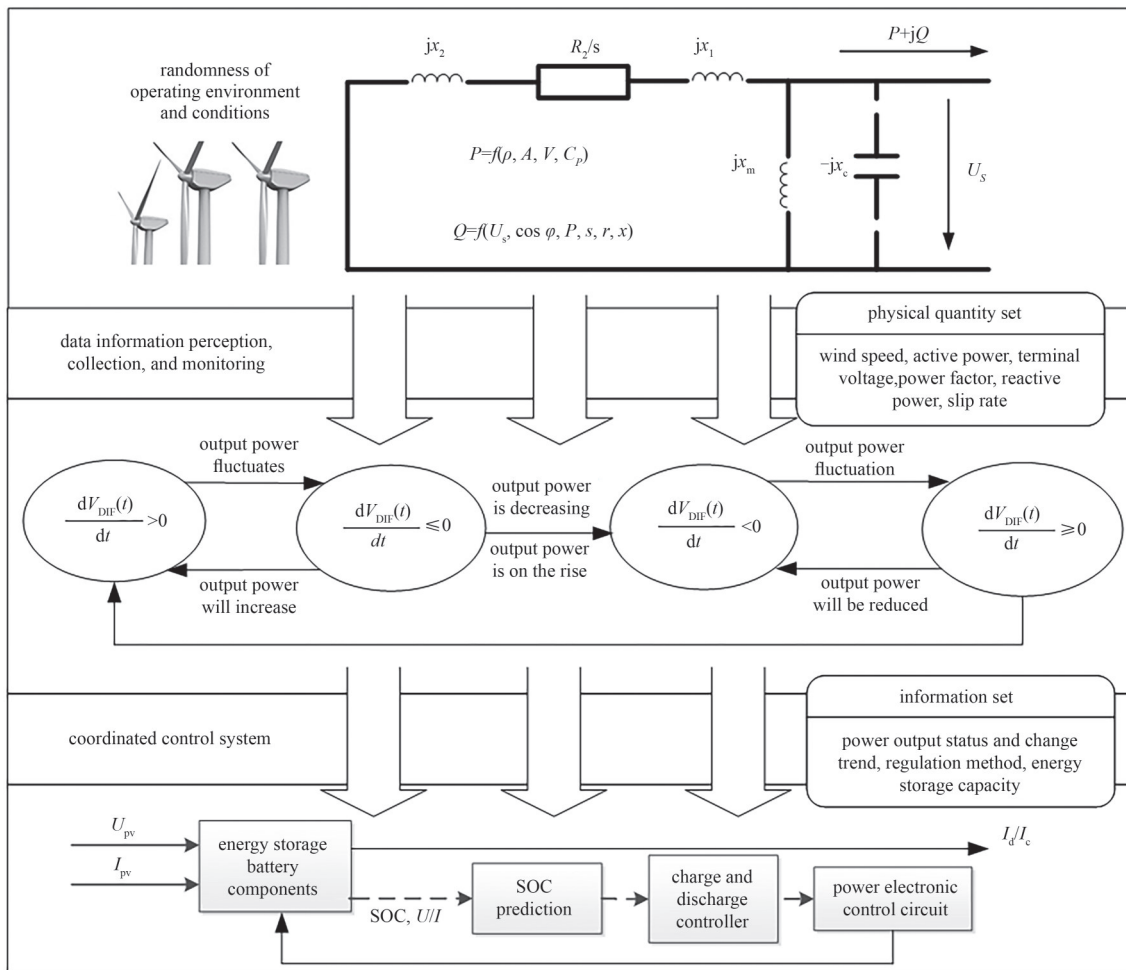


Fig.3 Changing process of the distribution system operation scenario with the integration of information and physics

图3 信息与物理融合的配电系统运行场景变化过程

3 基于概率密度演化的配电系统概率潮流计算方法

3.1 潮流计算基本方程

电力系统潮流计算中,节点 i 的有功功率 P_i 和无功功率 Q_i 的计算为:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (18)$$

式中: U_i 和 U_j 为对应节点的幅值电压; θ_{ij} 为节点之间电压的相位差; G_{ij} 为节点间线路的电导; B_{ij} 为节点之间线路电纳。

电力系统潮流计算中线路功率的方程为:

$$\begin{cases} P_{ij} = -U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + k_{ij} G_{ij} U_i^2 \\ Q_{ij} = -U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + (B_{ij} - b_{ij}) U_i^2 \end{cases} \quad (19)$$

式中: P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为节点 i 和 j 之间线路传输的有功和无功功率; k_{ij} 为线路中变压器的变比; b_{ij} 为节点 i 和 j 之间线路导纳的半值。

令状态变量 X 为节点电压, Y 为节点的注入功率, Z 为线路功率, 则可将式(18)~(19)表示为:

$$\begin{cases} Y = F(X) \\ Z = G(X) \end{cases} \quad (20)$$

3.2 概率密度演化方程

概率论中的概率守恒原则是随机动力学研究的基石, 主张在保守随机系统的状态连续变化中, 系统内的概率总量维持恒定, 保守随机系统在状态演变中不产生或失去随机变量^[21]。基于此, 陈建兵等^[22]提出了一种与结构动力学领域相关的概率密度演化法, 并发展了相应的演化方程, 专注于追踪随机动力系统状态变量概率密度函数的时变特性。考虑一个具有 m 维的随机系统:

$$\dot{Q} = A(Q, \Theta, t), Q(t_0) = X_0 \quad (21)$$

式中: Θ 为系统中的随机变量; X_0 为初始时刻状态变量, t 为时间变量; t_0 为初始时刻。

对应的随机事件表达式为:

$$Q = F(Q_0, \Theta, t) \quad (22)$$

对式(22)求偏导后得到演化速度表达式:

$$\dot{Q} = \frac{\partial Q}{\partial t} = f(Q_0, \Theta, t) \quad (23)$$

依据概率守恒原理, 可求得对应待求变量 Q 的概率密度演化方程:

$$\frac{\partial p_Q(q, \theta, t)}{\partial t} + \sum_{j=1}^m f_j(\theta, t) \frac{\partial p_Q(q, \theta, t)}{\partial q_j} = 0 \quad (24)$$

式中: $p_Q(q, \theta, t)$ 为状态变量 Q 和随机变量 Θ 的联合概率密度函数, q 为状态变量 Q 的取值, θ 为随机变量 Θ 的取值; $f_j(\theta, t)$ 为 Q 的第 j 个状态分量的速度表达式。

对 $p_Q(q, \theta, t)$ 进行解析, 得到 Θ 的离散代表点空间 Ω_θ , 在该空间内对 $p_Q(q, \theta, t)$ 积分, 获得 Q 的概率密度函数:

$$P_Q(q, t) = \int_{\Omega_\theta} p_Q(q, \theta, t) d\theta \quad (25)$$

3.3 潮流计算的随机演化过程建立

从电力系统潮流计算的简化方程式(20)中, 已知 X 、 Y 、 Z 之间的转换关系。而在具体潮流计算中, Y 通常作为已知的输入量, 用以计算 X 和 Z 这些输出量。通过对输入输出变量关系的理解, 对式(20)进行转换:

$$\begin{cases} X = F^{-1}(Y) = H(Y) \\ Z = G(X) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} X = H(Y) \\ Z = G[H(Y)] = I(Y) \end{cases} \quad (26)$$

不同于常规的概率潮流计算方法, 概率密度演化法依赖于一个具备动态变化特性的模拟随机系统^[23-24]。为量化这一随机变化过程的动态性, 提出一个概念上的时间度量, 即引入了虚拟时间 t , 以此评估这一随机系统演化的时间维度, 从而更好地捕捉系统状态的变化:

$$\begin{cases} X(t) = H(\Theta, t) \\ Z(t) = I(\Theta, t) \end{cases} \quad (27)$$

对虚拟时间 t 求偏导, 可得 X 和 Y 随时间变化的速率:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = \frac{\partial X}{\partial t} = h(\Theta, t) \\ \dot{Z}(t) = \frac{\partial Z}{\partial t} = i(\Theta, t) \end{cases} \quad (28)$$

采用分量形式表达为:

$$\begin{cases} \dot{X}_l(t) = h_l(\Theta, t), l = 1, 2, \dots, m \\ \dot{Z}_k(t) = i_k(\Theta, t), k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (29)$$

设 X 、 Y 、 Z 的随机参数 Θ 的联合概率密度函数分别为 $P_X(x, \theta, t)$ 和 $P_Z(z, \theta, t)$, 令 $t=1$, 对联合概率密度函数在 Θ 的空间 Ω_θ 上求数值积分, 得到各自的概率密度函数 $P_X(x)$ 和 $P_Z(z)$:

$$\begin{cases} P_X(x) = \int_{\Omega_\theta} P_X(x, \theta, t=1) d\theta \\ P_Z(z) = \int_{\Omega_\theta} P_Z(z, \theta, t=1) d\theta \end{cases} \quad (30)$$

3.4 潮流计算的概率密度演化方程推导

在概率守恒的随机系统中, 根据概率守恒原理, 可以推导出式(31)来描述随机事件:

$$P\{(X(t), \theta) \in (\Omega_\theta \times \Omega_t)\} = P\{(X(t+dt), \theta) \in (\Omega_\theta \times \Omega_{t+dt})\} \quad (31)$$

用联合概率密度函数的形式将式(30)转化为:

$$\int_{\Omega_\theta \times \Omega_t} p_X(x, \theta, t) dx d\theta = \int_{\Omega_\theta \times \Omega_{t+dt}} p_X(x, \theta, t+dt) dx d\theta = \int_{\Omega_\theta \times \Omega_{t+dt}} \left[p_X(x, \theta, t) + \frac{\partial p_X(x, \theta, t)}{\partial t} dt \right] dx d\theta \quad (32)$$

式中 $\int_{\Omega_\theta \times \Omega_t} (\partial p_X(x, \theta, t) / \partial t) dt dx d\theta$ 表示在区域 $(\Omega_\theta \times \Omega_t)$ 中 dt 时间内的增量。

Ω_t 区域在下一个 dt 时间后演化变为 Ω_{t+dt} , 这一演化过程能够通过区域边界的动态调整直观呈现, 可用式(33)表示:

$$\Omega_{t+dt} = \Omega_t + \int_{\partial\Omega_t} (V_X dt) \cdot \mathbf{n}_t dS_t = \Omega_t + \int_{\partial\Omega_t} (h(\theta, t) dt) \mathbf{n}_t dS_t \quad (33)$$

式中: V_X 为 X 的演化速率; $\mathbf{n}_t$ 为区域边界 $\partial\Omega_t$ 的单位向量; S_t 是区域 Ω_t 边界 $\partial\Omega_t$ 的元素。

将式(33)代入式(32), 可得穿过 $\Omega_\theta \times \Omega_t$ 边界的概率为:

$$\int_{\Omega_\theta \times \Omega_{t+dt}} p_X(x, \theta, t+dt) dx d\theta = \int_{\Omega_\theta \times \Omega_t} \left(p_X(x, \theta, t) + \frac{\partial p_X(x, \theta, t)}{\partial t} dt \right) dx d\theta + \int_{\Omega_\theta \times \partial\Omega_t} \left(p_X(x, \theta, t) + \frac{\partial p_X(x, \theta, t)}{\partial t} dt \right) [h(\theta, t) dt] \mathbf{n}_t dS_t d\theta \quad (34)$$

此值应与 $\int_{\Omega_\theta \times \Omega_t} (\partial p_X(x, \theta, t) / \partial t) dt dx d\theta$ 相等, 因此可得

$$\int_{\Omega_\theta \times \Omega_t} \left(\frac{\partial p_X(x, \theta, t)}{\partial t} dt \right) dx d\theta = - \int_{\Omega_\theta \times \partial\Omega_t} \left(p_X(x, \theta, t) + \frac{\partial p_X(x, \theta, t)}{\partial t} dt \right) [h(\theta, t) dt] \mathbf{n}_t dS_t d\theta \quad (35)$$

依据高斯通量理论, 式(35)可用如下形式表示:

$$\int_{\Omega_\theta \times \Omega_t} \left(\frac{\partial p_X(x, \theta, t)}{\partial t} dt \right) dx d\theta = - \int_{\Omega_\theta \times \partial\Omega_t} \sum_{l=1}^m \left(\frac{\partial p_X(x, \theta, t)}{\partial x_l} h_l(\theta, t) \right) dt dx d\theta \quad (36)$$

对节点电压 X 进行积分计算, 可得到其密度函数的偏微分方程:

$$\frac{\partial p_X(x, \theta, t)}{\partial t} + \sum_{l=1}^m h_l(\theta, t) \frac{\partial p_X(x, \theta, t)}{\partial x_l} = 0 \quad (37)$$

同理, 对线路功率 Z 进行相同运算:

$$\frac{\partial p_Z(z, \theta, t)}{\partial t} + \sum_{k=1}^n i_k(\theta, t) \frac{\partial p_Z(z, \theta, t)}{\partial z_k} = 0 \quad (38)$$

式(37)和式(38)为潮流计算的概率密度演化方程。

3.5 潮流计算的概率密度演化方程求解

采用有限差分法求解潮流计算中的概率密度演化方程, 这一方程以微分形式呈现。首先, 对输出变量 X 和 Z 及虚拟时间 t 进行离散; 然后, 利用有限差分法中的Lax-Wendroff格式求解离散化的联合概率密度函数:

$$p_{j,k} = \frac{1}{2}(w^2 r_L^2 - w r_L)p_{j+1,k-1} + (1 - w^2 r_L^2)p_{j,k-1} + \frac{1}{2}(w^2 r_L^2 + w r_L)p_{j-1,k-1} \quad (39)$$

求解式(39)可得 X 和 Z 的联合密度函数 $P_x(x, \theta, t)$ 和 $P_z(z, \theta, t)$, 将其代入式(30), 可得到对应的密度函数 $P_x(x)$ 和 $P_z(z)$, 对其积分可得概率分布函数分别为:

$$\begin{cases} c_x(x) = \int p_x(x) dx \\ c_z(z) = \int p_z(z) dz \end{cases} \quad (40)$$

3.6 基于概率密度演化方程(PDEE)的概率潮流计算方法流程

- 1) 输入概率潮流计算所需的关键数据, 如线路的阻抗参数、损耗特性、DG出力数据、以及不同节点上的负荷功率信息等;
- 2) 建立不确定因素(如负荷功率和DG联合出力)的概率模型;
- 3) 运用Frank-Copula函数构建DG联合出力模型^[25], 生成模拟场景, 形成随机参数空间 Ω_θ 下的代表点集合 $\Theta = \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$;
- 4) 对这 q 个代表点进行P-Q分解法潮流计算^[26], 得到所求输出变量节点电压 X 和线路功率 Z 的样本集合;
- 5) 根据上述所得的样本合集构建虚拟的随机演化过程, 并推导出相应的密度演化方程;
- 6) 使用Lax-Wendroff差分格式求解, 将函数按时间和空间离散化近似原始方程, 得到 X 和 Z 的联合密度函数 $P_x(x, \theta, t)$ 和 $P_z(z, \theta, t)$;
- 7) 当虚拟时间 $t=1$ 时, 在虚拟区域空间对 $P_x(x, \theta, t)$ 和 $P_z(z, \theta, t)$ 进行积分, 得到 X 和 Z 的密度函数 $P_x(x)$ 和 $P_z(z)$, 再进行积分则可得各自的分布函数 $c_x(x)$ 和 $c_z(z)$ 。

4 仿真算例

为验证本文提出的基于信息物理融合的概率潮流计算方法的有效性, 选择IEEE 34节点配电系统作为仿真对象。该系统中包括风力发电和光伏发电单元, 分别接入系统的多个节点, 形成了典型的含分布式电源的配电系统结构, 如图4所示。

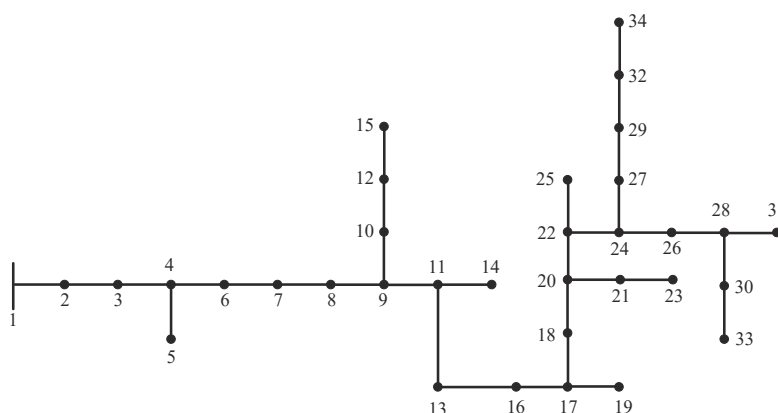


Fig.4 Wiring diagram of IEEE 34 power distribution system
图4 IEEE 34节点配电系统接线图

为验证所提方法在准确度、计算效率以及在处理电力系统随机性方面等的优越性, 将本文方法与经典的蒙特卡洛模拟技术以及半不变量法进行全面对比。

本文中, IEEE 34节点配电系统基准电压设置为24.9 kV, 基准容量为1 MV。系统包含200 kW的风力发电机组和200 kW的光伏发电阵列, 均连接于34号节点。工业区负荷连接至23号节点, 商务区负荷至29号节点, 居民区负荷至31号节点, 其余节点采用单一高斯分布^[27]。仿真过程中设定了多种时变运行场景, CPS通过场景跟

踪因子动态捕捉风光出力的波动，并将这些波动数据输入到概率潮流计算框架中。通过信息层与物理层的融合，该系统能够在不同的场景下动态调整储能设备的充放电策略，以平滑分布式电源的波动性，保证配电系统的稳定运行。

仅依靠均值和方差无法充分揭示由高斯混合负荷引起的电压分布的多峰特性。因此，本文以 10 000 次蒙特卡罗 (MC) 仿真计算结果作为基准数据，引入平均均方根误差 (Average Root Mean Square Error, ARMSE) 作为分析标准：

$$E_{\text{ARMS,CM}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (R_{\text{MC},i} - R_{\text{CM},i})^2}}{N} \quad (41)$$

$$E_{\text{ARMS,PDEE}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (R_{\text{MC},i} - R_{\text{PDEE},i})^2}}{N} \quad (42)$$

式中： $E_{\text{ARMS,CM}}$ 表示半不变量法与 MC 结果的差异； $E_{\text{ARMS,PDEE}}$ 表示概率密度演化方程法与 MC 结果的差异； $R_{\text{MC},i}$ 、 $R_{\text{CM},i}$ 和 $R_{\text{PDEE},i}$ 分别表示蒙特卡罗法、半不变量法和概率密度演化方程法的概率分布函数在采样点上的概率值； N 为概率分布函数上的采样点总数。

将数据转换为曲线图，图 5~图 7 清晰地展示 3 种概率潮流计算方法性能的直观比较。尽管 3 种方法在各节点电压均值相差不大，但 PDEE 法和 MC 法计算所得的电压方差结果更为接近，生成的线路有功功率的概率分布更加精确。通过对系统节点均值曲线的分析可知，辐射状配电网随着线路的扩展，网络末端的节点电压逐步下降，低电压现象变得更为显著。因此，建议在末端区域部署适当容量的分布式电源提升电压水平，改善低电压引起的电能质量问题。但分布式电源的接入也导致了系统末端电压方差增大，即电压波动幅度加大，存在更高的电压超限风险。而根据 ARMSE 结果显示，PDEE 法的计算误差远低于 CM 法，准确度提高了近一个数量级，表明本文所提的 PDEE 法计算准确度更高。这主要得益于它考虑了分布式电源联合出力之间的相关性。相比之下，半不变量法假设各随机变量相互独立，导致误差产生。

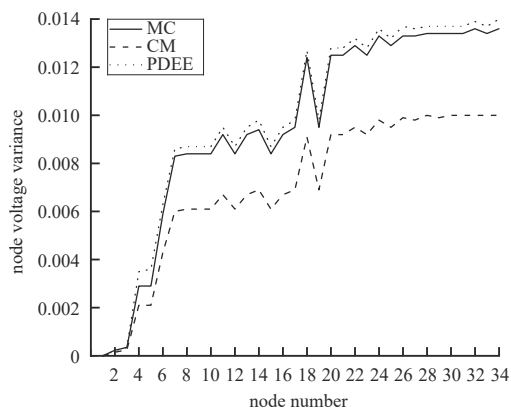


Fig.6 Variance of the voltage at each node of the system
图 6 系统各节点电压的方差

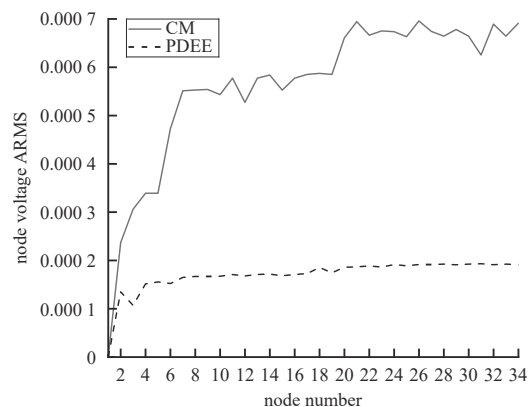


Fig.7 ARMS of voltage at each node of the system
图 7 系统各节点电压的 ARMS

表 2 对比了 3 种概率潮流计算技术的仿真时长。蒙特卡罗法耗时最长，系统规模增加时计算时间相应增长。半不变量法耗时较短，但精确度较低，因为采用了多种近似处理。概率密度演化方程法耗时略长于半不变量法，但远低于蒙特卡罗法，且保持较高精确度。

仿真结果显示，本文提出的基于概率密度演化方程的潮流计算方法在多个方面优于传统方法。首先，在节点电压和线路功率的概率分布预测中，本文方法能够更准确地反映系统的时变特性，特别是在处理负荷的多峰分布时表现优越。其次，在计算效率方面，与蒙特卡罗法相比，本文方法大幅减少了计算时间，同时保持了较高的计算精确度。特别是在处理复杂的随机因素和时变运行场景时，本文提出的方法能够快速响应 CPS 感知到的

表 2 3 种方法仿真时长

Table2 Simulation time of three methods

method	calculation time/s
MC	67.752 6
CM	0.551 6
PDEE	4.586 4

变化, 确保系统的稳定运行。

5 结论

本文结合 CPS 和 PDEE, 提出了一种新型的概率潮流计算方法, 旨在解决配电系统中分布式电源接入所带来的随机性和波动性问题。本文提出的基于 CPS 融合表示的概率潮流计算方法不仅有效提高了系统的响应速度和计算效率, 同时增强了系统对不确定性波动的适应能力。未来的工作将进一步结合数智化技术, 优化信息物理融合框架中的智能控制算法, 探索基于大数据驱动和人工智能方法的负荷建模技术, 提升方法在大规模分布式电源接入、动态运行和多能源协同优化下的实用性和推广性, 为构建高效、安全、智能的数智化能源互联网提供更加坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 张洪略, 万毅, 王家军, 等. 基于数据挖掘算法的电网调度信号异常数据提取方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024, 22(7): 800–806. (ZHANG Honglve, WAN Yi, WANG Jiajun, et al. Abnormal data extracting from power grid dispatching signals based on data mining algorithms[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024, 22(7): 800–806.) DOI:10.11805/TKYDA2023381.
- [2] 林昶咏, 吴桂联, 张林垚, 等. 分布式电源接入配电系统优化规划方案[J]. 现代电力, 2019, 36(6): 82–87. (LIN Changyong, WU Guilian, ZHANG Linyao, et al. Planning scheme optimization for distributed generation accessed in distribution system[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(6): 82–87.) DOI:10.3969/j.issn.1007-2322.2019.06.012.
- [3] 温喜灵, 黄华颖, 饶苏敏, 等. 考虑分布式电源系统特性的配电网短路电流计算模型研究[J]. 电工技术, 2024(4): 158–161. (WEN Xiling, HUANG Huaying, RAO Sumin, et al. Study on short-circuit current calculation model for distribution networks considering distributed power system characteristics[J]. Electric Engineering, 2024(4): 158–161.) DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2024.04.043.
- [4] 吴龙腾, 邱泽坚. 分布式电源并网对配电网系统的影响及改善策略[J]. 光源与照明, 2023(1): 171–173. (WU Longteng, QIU Zejian. The impact of distributed power grid connection on distribution network system and improvement strategies[J]. Lamps and Lighting, 2023(1): 171–173.)
- [5] 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. (YANG Xiaoping, WANG Lijin. Optimization of distributed power distribution network based on probabilistic load flow[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2021, 42(8): 71–76.) DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2019-0677.
- [6] 陈娥. 含分布式电源配电网的概率潮流计算方法的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020. (CHEN E. The impact of distributed power grid connection on distribution network system and improvement strategies[D]. Guangzhou, China: Guangdong University of Technology, 2020.) DOI:10.27029/d.cnki.ggdgu.2020.001265.
- [7] 许礼彬, 廖星星. 计及新能源出力不确定性的配电网概率潮流分析[J]. 江西电力, 2024, 48(1): 49–52, 67. (XU Libin, LIAO Xingxing. Probabilistic power flow analysis of distribution network considering the uncertainty of new energy output[J]. Jiangxi Electric Power, 2024, 48(1): 49–52, 67.) DOI:10.3969/j.issn.1006-348X.2024.01.009.
- [8] XU Hanyu, QING An. Research on estimation probability power flow calculation of cistribution network considering distributed generation[C]// 2017 China International Electrical and Energy Conference(CIEEC). Beijing, China: IEEE, 2017: 13–16. DOI: 10.1109/CIEEC.2017.8388412.
- [9] WIDÉN J, SHEPERO M, MUNKHAMMAR J. Probabilistic load flow for power grids with high PV penetrations using Copula-based modeling of spatially correlated solar irradiance[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2017, 7(6): 1740–1745. DOI:10.1109/JPHOTOV.2017.2749004.
- [10] LI Ning, ZHOU Guo, ZHOU Yongquan, et al. Multi-objective pathfinder algorithm for multi-objective optimal power flow problem with random renewable energy sources: wind, photovoltaic and tidal[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 10647.
- [11] 石敏, 周步祥, 张冰, 等. 计及分布式电源不确定性的配电网系统可靠性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(12): 114–120. (SHI Min, ZHOU Buxiang, ZHANG Bing, et al. Reliability assessment of distribution network system considering the output uncertainties of distributed generations[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(12): 114–120.) DOI: 10.3969/j.issn.1003-8930.2017.12.017.
- [12] 程濛, 刘舒然, 骆琪霖. 基于高斯混合模型的配电网大规模光伏与电动汽车充电桩协同规划[J]. 供用电, 2023, 40(1): 18–24. (CHENG Meng, LIU Shuran, LUO Qilin. Collaborative planning of large-scale photovoltaic and electric vehicle charging stake in distribution network based on Gaussian mixture model[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(1): 18–24.) DOI:10.19421/j.cnki.

- 1006-6357.2023.01.003.
- [13] 李振嘉,叶鹏,张强,等. 分布式能源和电能替代负荷接入的配电网综合负荷概率模型[J]. 河北电力技术, 2022,41(3):9-14, 53. (LI Zhenjia, YE Peng, ZHANG Qiang, et al. Integrated load probability model in distribution network with distributed energy sources and electric energy substitution[J]. Hebei Electric Power, 2022,41(3):9-14,53.) DOI:10.3969/j.issn.1001-9898.2022.03.002.
- [14] 曹宏宇,梁言贺,刘惠颖,等. 考虑电源与负荷间存在非正定相关性的概率潮流计算方法研究[J]. 电测与仪表, 2024,61(7): 109-115. (CAO Hongyu, LIANG Yanhe, LIU Huiying, et al. Research on probabilistic power flow calculation method considering non-positive definite correlation between power source and load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024,61(7): 109-115.) DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2024.07.016.
- [15] 安世兴. 考虑分布式电源接入的城市配电网运行风险评估[D]. 天津:河北工业大学, 2020. (AN Shixing. Operation risk assessment of urban distribution network considering distributed generation access[D]. Tianjin, China: Hebei University of Technology, 2020.) DOI:10.27105/d.cnki.ghbgu.2020.001084.
- [16] HASAN K N, PREECE R, MILANOVIĆ J V. Existing approaches and trends in uncertainty modelling and probabilistic stability analysis of power systems with renewable generation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019(101):168-180. DOI: 10.1016/j.rser.2018.10.027.
- [17] WU Xiaomeng, GUO Xinyu, YANG Mingyue, et al. A survey of power flow calculations considering distributed generation[J]. Journal of Physics:Conference Series, 2019,1237(2):022076. DOI:10.1088/1742-6596/1237/2/022076.
- [18] 惠振国,艾澜,常鹏霞,等. 计及风光出力相关性的风光水储互补系统优化调度[J]. 水电能源科学, 2024,42(8):218-222. (HUI Zhenguo, AI Lan, CHANG Pengxia, et al. Optimal scheduling of wind-solar-water-storage complementary system considering the correlation of wind-solar output[J]. Water Resources and Power, 2024,42(8):218-222.) DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2024.20231575.)
- [19] 徐艳春,李思佳,汪平,等. 考虑分布式电源时空相关及电动汽车充电负荷分布特性的有源配电网概率潮流[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2550-2563. (XU Yanchun, LI Sijia, WANG Ping, et al. Probabilistic load flow of active distribution network considering spatial-temporal correlation of distribution generation and distribution characteristics of electric vehicle charging load[J]. Power System Technology, 2024,48(6):2550-2563.) DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0197.
- [20] LIAO Xiaobing, ZHANG Yiming, LI Zicheng, et al. Probabilistic interval power flow calculation method for distribution networks considering the correlation of distributed wind power output[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024(157):109827. DOI:10.1016/j.ijepes.2024.109827.
- [21] 贾向恩,宁永龙,顾勇. 计及分布式电源不确定性的配电网概率潮流计算[J]. 电气自动化, 2021,43(2):57-60. (JIA Xiang'en, NING Yonglong, GU Yong. Calculation of distribution network probabilistic load flow considering uncertainty of distributed generation[J]. Electrical Automation, 2021,43(2):57-60.) DOI:10.3969/j.issn.1000-3886.2021.02.020.
- [22] 刘章军,陈建兵. 概率密度演化-结构动力学[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012. (LIU Zhangjun, CHEN Jianbing. Probability density evolution-structural dynamics[M]. Beijing, China: China Waterpower Press, 2012.)
- [23] 陈思思. 计及分布式电源发电相关性的概率潮流算法研究[D]. 广州:华南理工大学, 2019. (CHEN Sisi. Research on probabilistic power flow algorithm considering the correlation of distributed power generation[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2019.) DOI:10.27151/d.cnki.ghnlu.2019.003228.
- [24] 郭弘原,顾祥林,周彬彬,等. 基于概率密度演化的锈蚀混凝土梁时变可靠性分析[J]. 建筑结构学报, 2019,40(1):67-73. (GUO Hongyuan, GU Xianglin, ZHOU Binbin, et al. Time-dependent reliability analysis for corroded RC beams based on probability density evolution theory[J]. Journal of Building Structures, 2019,40(1):67-73.) DOI:10.14006/j.jzjgxb.2019.01.007.
- [25] 刘俊,郝旭东,程佩芬,等. 结合 M-Copula 理论与半不变量的随机潮流方法[J]. 电网技术, 2018,42(2):578-584. (LIU Jun, HAO Xudong, CHENG Peifen, et al. Probabilistic load flow method combining M-Copula theory and cumulants[J]. Power System Technology, 2018,42(2):578-584.) DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1253.
- [26] 曹宏宇,梁言贺,刘惠颖,等. 考虑风-光-储不确定性的新型电力系统概率潮流计算[J]. 电测与仪表, 2024,61(6):87-93. (CAO Hongyu, LIANG Yanhe, LIU Huiying, et al. Probabilistic power flow calculation of novel power system considering uncertainty of wind-light-storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024,61(6):87-93.) DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2024.06.012.
- [27] 李静,李幸芝,韩蓓,等. 考虑分布式电源不确定性与相关性的配电网状态估计[J]. 全球能源互联网, 2020,3(3):231-237. (LI Jing, LI Xingzhi, HAN Bei, et al. State estimation in distribution systems considering distributed generation uncertainties with correlations[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020,3(3):231-237.) DOI:10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2020.03.003.