

引用格式:王立强,刘鸿清,丛雨.基于高斯混合模型的配电网分布式光伏接入影响量化分析方法[J].内蒙古电力技术,2024,42(4):93-100.
WANG Liqiang, LIU Hongqing, CONG Yu. Quantitative Analysis Method for Impact of Distributed Photovoltaic Access in Distribution Networks Based on Gaussian Mixture Model[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2024, 42(4): 93-100.

基于高斯混合模型的配电网分布式光伏接入 影响量化分析方法

王立强,刘鸿清,丛雨

(内蒙古电力(集团)有限责任公司内蒙古电力科学研究院分公司,呼和浩特 010020)

摘要:针对大量光伏并网后对配电网的影响难以准确评估的问题,提出一种基于高斯混合模型的配电网分布式光伏接入影响量化分析方法。首先,基于配电台区节点负荷历史数据和太阳辐照强度历史数据,建立基于高斯混合模型理论的配电台区节点注入功率的不确定性模型,通过线性化潮流方法计算得到配电台区的节点电压幅值、支路有功潮流等电气量的概率密度函数;其次,建立分布式光伏接入影响量化评估指标体系,并提出分布式光伏接入影响量化评估方法;最后,基于算例对本文所提方法进行验证。

关键词:配电网;分布式光伏;高斯混合模型;节点负荷;风险指标

文献标志码:B

文章编号:1008-6218(2024)04-0093-08

中图分类号:TM933;TM615

doi:10.19929/j.cnki.nmgdljs.2024.0059

Quantitative Analysis Method for Impact of Distributed Photovoltaic Access in Distribution Networks Based on Gaussian Mixture Model

WANG Liqiang, LIU Hongqing, CONG Yu

(Inner Mongolia Power(Group) Co.,Ltd., Inner Mongolia Electric Power Research Institute Branch, Hohhot 010020, China)

Abstract: Aiming at the problem of difficulty in accurately assessing the impact of a large number of PV connected to the grid on the distribution network, a method of quantitative analysis for the impact of distributed PV access on the distribution network based on Gaussian mixture model is proposed in this paper. Firstly, based on the historical data of node load and solar irradiation intensity in distribution station area, an uncertainty model of the node injection power in the distribution station area is established based on the Gaussian mixture model theory, and the probability density function of the node voltage amplitude, branch circuit active power flow and other electrical quantities in the distribution station area is calculated by the linearized power flow method. Secondly, the quantitative evaluation index system for the impact of distributed PV access is established, and the quantitative evaluation method of distributed PV access impact is proposed. Finally, the method proposed in this paper is verified based on the case analysis.

Key words: distribution grid; distributed photovoltaic; Gaussian mixture model; node load; risk indicators

0 引言

随着光伏发电相关政策和技術标准的相继出台,国内并网光伏容量近年来呈现急剧上升的趋势。大规模分布式光伏的接入一方面引发了系统

潮流方向的改变,影响了系统电压与功率分布,造成了电压越限和潮流越限等问题;另一方面,不同场景下分布式光伏对配电网的运行状态影响程度不同,传统单一的评估方法难以准确刻画系统多维度的风险。因此,亟需寻找新方法对分布式光伏接

入配电网所造成的影响进行更为精准的量化分析。

分布式光伏的出力具有很强的随机性和波动性,为分析分布式光伏接入对电网的影响,文献[1]采用恒功率模型表示光伏电源,将分布式光伏并网节点处理为PQ节点,通过标准IEEE33节点系统仿真分析了分布式光伏的接入形式、接入容量以及接入位置对配电网网络损耗的影响。文献[2]分析了不同分布式光伏的并网容量对配电网网络损耗造成的影响,并详细阐述了分布式光伏并网的容量匹配策略。文献[3]考虑了设备的老化、故障率等因素,面向含大量分布式光伏的孤岛运行场景,提出了可用于评估配电网供电可靠性的指标体系。文献[4]充分考虑了因素有分布式电源出力不确定性、负荷不确定性、储能装置的加入等因素,对孤岛运行场景下含分布式电源的配电网的可靠性进行了评估。文献[5]建立了光伏并网系统额可靠性分析模型,研究了光伏电源并网对配电网可靠性的影响;文献[6]在含新能源的电网状态脆弱性评估中考虑到短路容量这一指标,采用聚类算法对薄弱节点进行辨识,能够实现在线应用。

针对源荷不确定性问题,文献[7]采用了高斯混合模型法,用多个高斯分布概率密度函数的加权之和去拟合任意概率密度函数。文献[8]将高斯混合模型(Gaussian Mixture Model, GMM)用于负荷建模,通过线性化潮流方程直接计算出带负载的潮流分布,该方法所用的计算时间比得到相同精度的蒙特卡洛法减少了3%。文献[9]通过GMM表示所有负载概率密度函数,用期望最大化算法来求解各组分函数的参数。文献[10]采用高斯混合模型来准确描述多个风电场功率的联合概率分布,利用GMM的优良性质,依据系统状态量与风功率之间的近似线性关系,获得系统状态量的联合概率分布,经过与蒙特卡罗仿真法比较,结果表明,该方法准确度更高,计算速度更快。由于分布式光伏电源的出力与天气因素息息相关,文献[11]提出了一种基于反馈型的神经网络和BP分布式光伏电源电池组的功率预测模型,并给出了相关的模型评估,模型算法等方面的研究设计方案。文献[12]利用Matlab软件建立了考虑光照不足条件约束下的一种分布式光伏电池模型,并分析了在光照不足的条件下对电池组性能造成的影响,其分布式光伏电池组的实质是一种带旁路的二极管。文献[13]通过利用分布式光伏电源出力特性分段法搭建了分布式光伏电源模型,并对不同时段条件下的输出特性进行了研究。文

献[14]利用智能算法搭建分布式光伏电源出力模型,并对其进行最大功率追踪,从而提高分布式光伏阵列的输出效率和系统发电效率。

相较于传统分析模型,GMM可以从多个维度分析区域内所接入的分布式光伏出力之间耦合的时空关系。基于描述结果,可对分布式光伏并网对配电网的影响进行更为精准的分析。因此,本文提出了一种基于高斯混合模型的配电网分布式光伏接入影响量化分析方法。首先,基于配电网节点负荷历史数据和太阳辐照强度历史数据,建立了基于GMM理论的配电网节点注入功率的不确定性模型,通过线性化潮流方法计算得到配电网的节点电压幅值、支路有功潮流等电气量的概率密度函数;其次,建立了分布式光伏接入影响量化评估指标体系,并提出了分布式光伏接入影响量化评估方法;最后,基于算例对本文所提方法进行验证。

1 基于GMM的配电网概率潮流算法

1.1 节点注入功率的不确定性模型

受日照、风速、气温等气象因素的影响,分布式光伏等可再生能源发电功率随机性强,难以准确预测,因此需要对分布式光伏发电功率不确定性进行描述。由于配电台区覆盖空间范围有限,各分布式光伏出力差异性较小,近似认为同一配电台区的分布式光伏出力服从相同的分布。

基于配电台区节点负荷和光照辐照强度一年的统计数据,对每一小时内的节点负荷数据和光照辐照强度数据进行统计分析,由此生成每一小时内每个节点注入功率的数据,从而得到对应时段节点联合注入功率。

GMM作为一种不确定性因素的解析化表达方法,能够实现对非高斯随机变量的精确建模,利用EM算法实现不确定性参数估计,适用于在样本容量小或数据缺失等场景下对非高斯变量的不确定性进行刻画,在处理非高斯变量的不确定性及相关性方面具有较大优势。且与传统的韦伯分布、 β 分布模型相比,GMM具有更多优良的数学性质,如线性不变性、叠加性、条件概率不变性等。若将传统潮流方程线性化表达,得到系统运行状态与节点注入功率的线性化关系,利用GMM的线性不变性,即可实现将节点注入功率概率分布解析地映射为系统运行状态的联合概率分布,即电网的概率潮流。

以节点注入功率的随机变量 X 为例,利用若干

高斯分布的叠加形式表征其概率分布:

$$f_X(\mathbf{x}) = \sum_{m=1}^M \omega_m N_m(\mathbf{x} | \boldsymbol{\mu}_m, \boldsymbol{\sigma}_m), \sum_{m=1}^M \omega_m = 1, \omega_m > 0, (1)$$

$$N_m(\mathbf{x} | \boldsymbol{\mu}_m, \boldsymbol{\sigma}_m) = \frac{\exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_m)^\top (\boldsymbol{\sigma}_m)^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_m)\right]}{(2\pi)^{W/2} \det(\boldsymbol{\sigma}_m)^{1/2}}, (2)$$

式中: $f_X(\mathbf{x})$ 为随机变量 \mathbf{X} 的联合概率密度函数; ω_m 为权重系数; W 为 \mathbf{X} 的维度; N_m 表示多维正态分布, 它被称为 GMM 的第 m 个高斯分量; \det 为矩阵的行列式; M 为高斯分量的总数; $\boldsymbol{\mu}_m$ 和 $\boldsymbol{\sigma}_m$ 分别为第 m 个高斯分量的均值向量与协方差矩阵。

为求解式(1)所示 GMM, 需要进一步确定每一个高斯分量的未知参数 ω_m 、 $\boldsymbol{\mu}_m$ 和 $\boldsymbol{\sigma}_m$, 使得 GMM 最接近实际采样所得样本, 待求参数可通过极大似然估计法取得。

1.1.1 极大似然估计

采用极大似然估计求解 GMM 需要求得似然函数, 然后求解样本集的联合概率分布。首先引入隐变量 γ 表示每一次采样中选择第 m 个高斯分量的概率, 隐变量 γ 为二进制随机变量, 其维数为 M , 任一维只有特定元素 γ_m 取值非零, 表示为:

$$f_\Gamma(\gamma_m = 1) = \omega_m, (3)$$

式中: $f_\Gamma(\gamma_m = 1)$ 表示 γ_m 取值为 1 的概率。

首先确定隐变量 γ , 从特定的高斯分布中采样, 得到服从高斯分布的样本 \mathbf{x} 的条件概率分布:

$$f_{X|\Gamma}(\mathbf{x} | \gamma_m = 1) = N_m(\mathbf{x}; \boldsymbol{\mu}_m, \boldsymbol{\sigma}_m), (4)$$

则包含 m 个高斯分量的样本 \mathbf{x} 的概率密度函数为:

$$\begin{aligned} f_X(\mathbf{x}) &= \sum_\gamma f_\Gamma(\gamma) f_{X|\Gamma}(\mathbf{x} | \gamma) \\ &= \sum_{m=1}^M \omega_m N_m(\mathbf{x}; \boldsymbol{\mu}_m, \boldsymbol{\sigma}_m). \end{aligned} (5)$$

随机变量 \mathbf{X} 样本集的联合概率密度函数为:

$$\begin{aligned} L(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma}) &= L(x_1, x_2, \dots, x_N; \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma}) \\ &= \prod_{n=1}^N f_X(x_n; \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma}) \\ &= \prod_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \omega_m N_m(x_n; \boldsymbol{\mu}_m, \boldsymbol{\sigma}_m), \end{aligned} (6)$$

式中: N 为样本个数; x_1, x_2, \dots, x_N 为矩阵 \mathbf{X} 中的元素; $\boldsymbol{\omega}$ 为权重系数; $\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma}$ 为均值向量与协方差矩阵。

其对数似然函数为:

$$\ln L(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma}) = \sum_{n=1}^N \ln \sum_{m=1}^M \omega_m N_m(x_n; \boldsymbol{\mu}_m, \boldsymbol{\sigma}_m). (7)$$

对式(7)进行求导, 可得 GMM 参数 $(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma})$ 。由于式(7)中的对数中存在求和号, 求导过程困难, 引入最大期望算法 (Expectation-Maximization algorithm, EM) 进行改进。

1.1.2 EM 算法

EM 算法包括 E 步 (Expectation-step) 和 M 步 (Maximization-step), 适用于小样本参数估计问题。

1.1.2.1 E 步

在样本集 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_N)$ 中引入隐变量 $\gamma_{n,m}$, 表示样本 x_n 是从第 m 个高斯分量中采样得到。将样本展开得到完全数据集如下:

$$(x_n; \gamma_{n,1}, \gamma_{n,2}, \dots, \gamma_{n,m}), \quad n = 1, 2, \dots, N. (8)$$

为判断: ①第 n 个样本由哪个高斯分量产生; ②若该样本由第 m 个高斯分量产生, 则该高斯分量产生第 n 个样本的概率, 引入似然函数:

$$\begin{aligned} f_{X|\Gamma}(\mathbf{x}; \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma}) &= \prod_{n=1}^N f_{X_n|\Gamma_n}(x_n, \gamma_{n,1}, \gamma_{n,2}, \dots, \gamma_{n,M}; \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma}) \\ &= \prod_{n=1}^N \prod_{m=1}^M [\omega_m N_m(x_n; \boldsymbol{\mu}_m, \boldsymbol{\sigma}_m)]^{\gamma_{n,m}} \\ &= \prod_{m=1}^M \left\{ \omega_m^{\sum_{n=1}^N \gamma_{n,m}} \prod_{n=1}^N [N_m(x_n; \boldsymbol{\mu}_m, \boldsymbol{\sigma}_m)]^{\gamma_{n,m}} \right\}. \end{aligned} (9)$$

以 $N=1$ 为例, 其推导过程为:

$$\begin{aligned} f_{X_n|\Gamma_n}(x_n, \gamma_{n,1}, \gamma_{n,2}, \dots, \gamma_{n,M}; \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma}) &= \prod_{m=1}^M [\omega_m N_m(x_n; \boldsymbol{\mu}_m, \boldsymbol{\sigma}_m)]^{\gamma_{n,m}} \\ &= [\omega_1 N_1(x_n; \boldsymbol{\mu}_1, \boldsymbol{\sigma}_1)]^{\gamma_{n,1}} [\omega_2 N_2(x_n; \boldsymbol{\mu}_2, \boldsymbol{\sigma}_2)]^{\gamma_{n,2}} \cdots [\omega_M N_M(x_n; \boldsymbol{\mu}_M, \boldsymbol{\sigma}_M)]^{\gamma_{n,M}} \\ &= [\omega_1 N_1(x_n; \boldsymbol{\mu}_1, \boldsymbol{\sigma}_1)]^{\gamma_{n,1}} [\omega_2 N_2(x_n; \boldsymbol{\mu}_2, \boldsymbol{\sigma}_2)]^0 \cdots [\omega_M N_M(x_n; \boldsymbol{\mu}_M, \boldsymbol{\sigma}_M)]^0 \\ &= \omega_1 N_1(x_n; \boldsymbol{\mu}_1, \boldsymbol{\sigma}_1). \end{aligned} (10)$$

不缺失数据的似然函数可以表达为:

$$\begin{aligned} \ln f_{X|\Gamma}(\mathbf{x}; \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma}) &= \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^M \gamma_{n,m} \right) \ln \omega_m + \\ &= \sum_{n=1}^N \gamma_{n,m} \left[-\ln(2\pi) - \frac{1}{2} \ln |\boldsymbol{\sigma}_m| - \frac{1}{2} (\mathbf{x}_n - \boldsymbol{\mu}_m)^\top (\boldsymbol{\sigma}_m)^{-1} (\mathbf{x}_n - \boldsymbol{\mu}_m) \right]. \end{aligned} (11)$$

为了最大化 $\ln f_{X|\Gamma}(\mathbf{x}; \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma})$, 选取 Q 函数并使其最大化:

$$\begin{aligned} Q(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma}; \boldsymbol{\omega}^i, \boldsymbol{\mu}^i, \boldsymbol{\sigma}^i) &= E_\gamma \left[\ln f_{X|\Gamma}(\mathbf{x}; \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma}) \right] \Big| \boldsymbol{\omega}^i, \boldsymbol{\mu}^i, \boldsymbol{\sigma}^i \\ &= \sum_{m=1}^M \left[\sum_{n=1}^N E_\gamma(\gamma_{n,m}, \mathbf{x}_n; \boldsymbol{\omega}^i, \boldsymbol{\mu}^i, \boldsymbol{\sigma}^i) \right] \ln \omega_m + \\ &= \sum_{n=1}^N \left[\gamma_{n,m}, \mathbf{x}_n; \boldsymbol{\omega}^i, \boldsymbol{\mu}^i, \boldsymbol{\sigma}^i \times \right. \\ & \quad \left. \left(-\ln(2\pi) - \frac{1}{2} \ln |\boldsymbol{\sigma}_m| - \frac{1}{2} (\mathbf{x}_n - \boldsymbol{\mu}_m)^\top (\boldsymbol{\sigma}_m)^{-1} (\mathbf{x}_n - \boldsymbol{\mu}_m) \right) \right], \end{aligned} (12)$$

式中： $\omega^i, \mu^i, \sigma^i$ 分别为第*i*次迭代时，样本的权重、均值向量和协方差矩阵。

1.1.2.2 M步

在得到*Q*函数的基础上，以最大化*Q*为目标，得到下一次迭代的模型参数：

$$\omega^{i+1}, \mu^{i+1}, \sigma^{i+1} = \arg \max Q(\omega, \mu, \sigma; \omega^i, \mu^i, \sigma^i) \quad (13)$$

令*Q*函数一阶导数为零，得到：

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_m^{i+1} = \frac{E(\gamma_{n,m} | x_n; \omega^i, \mu^i, \sigma^i)}{N} \\ \mu_m^{i+1} = \frac{\sum_{n=1}^N \omega_m^i N(x_n; \mu_m^i, \sigma_m^i) x_n}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \omega_m^i N(x_n; \mu_m^i, \sigma_m^i)} \\ \sigma_m^{i+1} = \frac{\sum_{n=1}^N \omega_m^i N(x_n; \mu_m^i, \sigma_m^i) (x_n - \mu_m^i)^2}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \omega_m^i N(x_n; \mu_m^i, \sigma_m^i)} \\ m = 1, 2, \dots, M \end{array} \right. \quad (14)$$

式中： ω_m^{i+1} 、 μ_m^{i+1} 和 σ_m^{i+1} 分别为第*i+1*次迭代时，第*m*类样本的权重、均值和协方差矩阵。

1.2 配电网线性化潮流模型

采用线性潮流模型，节点注入功率形式的交流潮流方程为：

$$\left\{ \begin{array}{l} P_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (\mathbf{G} \cos \theta_{ij} + \mathbf{B} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (\mathbf{G} \sin \theta_{ij} - \mathbf{B} \cos \theta_{ij}) \end{array} \right. \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

式中：*i, j*为节点编号；*N*为节点数量； U_i 、 U_j 分别为节点*i, j*的电压幅值； P_i 、 Q_i 分别为节点*i*处注入的有功功率和无功功率； θ_{ij} 为节点*i, j*间的电压相角之差； \mathbf{G} 、 \mathbf{B} 分别为节点电导、电纳矩阵。

采用式(16)所示近似假设，该近似已被证明在两种典型情况下(高*R/X*比和低*R/X*比，*R, X*分别表示线路电阻和电抗)对线路潮流的近似效果都较好^[15]：

$$\begin{aligned} g_{ij} U_i (U_i - U_j \cos \theta_{ij}) &\approx g_{ij} U_i (U_i - U_j) \\ &= g_{ij} (1 + \Delta U_i) (\Delta U_i - \Delta U_j) \\ &\approx g_{ij} (\Delta U_i - \Delta U_j) \\ &= g_{ij} (U_i - U_j), \end{aligned} \quad (16)$$

式中： g_{ij} 为 \mathbf{G} 中的元素。

通过该近似可以使电压幅值和相位角解耦，如式(17)所示：

$$\begin{aligned} P_i &= U_i \sum_{j=1}^N U_j (\mathbf{G} \cos \theta_{ij} + \mathbf{B} \sin \theta_{ij}) \\ &= g_{ii} U_i^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^N [g_{ij} U_i (U_i - U_j \cos \theta_{ij}) - b_{ij} U_i U_j \sin \theta_{ij}] \\ &\approx g_{ii} U_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N g_{ij} (U_i - U_j) - \sum_{j=1, j \neq i}^N b_{ij} (\theta_i - \theta_j) \\ &= \left[U_i \sum_{j=1}^N g_{ij} + \sum_{j=1, j \neq i}^N -g_{ij} U_j \right] - \left[\theta_i \sum_{j=1, j \neq i}^N b_{ij} + \sum_{j=1, j \neq i}^N -b_{ij} \theta_j \right] \\ &= \sum_{j=1}^N \mathbf{G} U_j - \sum_{j=1}^N \mathbf{B}' \theta_j, \end{aligned} \quad (17)$$

式中： b_{ij} 为 \mathbf{B} 中的元素； \mathbf{B}' 为不含并联电抗的电纳矩阵。

同理可得：

$$Q_i = \sum_{j=1}^N \mathbf{B} U_j - \sum_{j=1}^N \mathbf{G} \theta_j \quad (18)$$

式(17)和式(18)的矩阵形式如式(19)所示：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{B} & -\mathbf{G} \\ \mathbf{G} & \mathbf{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \mathbf{U} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

式(19)中 $\boldsymbol{\theta}$ 和 \mathbf{U} 都由三个子向量组成，用下标*R, S, L*分别对应*Vθ*节点(平衡节点)、*PV*节点和*PQ*节点，将这些节点按*Vθ, PV, PQ*顺序排列可得：

$$\begin{cases} \boldsymbol{\theta} = [\boldsymbol{\theta}_R^T, \boldsymbol{\theta}_S^T, \boldsymbol{\theta}_L^T]^T \\ \mathbf{U} = [\mathbf{U}_R^T, \mathbf{U}_S^T, \mathbf{U}_L^T]^T \end{cases} \quad (20)$$

将节点导纳矩阵 \mathbf{Y} 按相同方式排列可得：

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{RR} & \mathbf{Y}_{RS} & \mathbf{Y}_{RL} \\ \mathbf{Y}_{SR} & \mathbf{Y}_{SS} & \mathbf{Y}_{SL} \\ \mathbf{Y}_{LR} & \mathbf{Y}_{LS} & \mathbf{Y}_{LL} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

式中：下标*RS*表示*Vθ*节点和*PV*节点之间的参数，其他同理。

根据*Vθ*节点、*PV*节点和*PQ*节点已知参数 Q_R 、 U_R 和 Q_S ，将式(19)转化为如下形式：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \mathbf{U} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

其中：

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} P_S \\ P_L \\ Q_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}'_{SR} & -\mathbf{G}_{SR} & -\mathbf{G}_{SS} \\ \mathbf{B}'_{LR} & -\mathbf{G}_{LR} & -\mathbf{G}_{LS} \\ \mathbf{G}_{LR} & \mathbf{B}_{LR} & \mathbf{B}_{LS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}_R \\ \mathbf{U}_R \\ \mathbf{U}_S \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{bmatrix} &= - \begin{bmatrix} \mathbf{B}'_{SS} & \mathbf{B}'_{SL} & -\mathbf{G}_{SL} \\ \mathbf{B}'_{LS} & \mathbf{B}'_{LL} & -\mathbf{G}_{LL} \\ \mathbf{G}_{LS} & \mathbf{G}_{LL} & \mathbf{B}_{LL} \end{bmatrix}, \\ \boldsymbol{\theta} &= [\boldsymbol{\theta}_S, \boldsymbol{\theta}_L], \\ \mathbf{U} &= \mathbf{U}_{L0} \end{aligned}$$

对式(22)执行基本行变换可得:

$$\begin{bmatrix} P-NL^{-1}Q \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H-NL^{-1}M & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ U \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} P \\ Q-MH^{-1}P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ \mathbf{0} & L-MH^{-1}N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ U \end{bmatrix}. \quad (24)$$

将式(23)第一部分和式(24)第二部分组合成一个方程,可实现电压幅值和相角解耦,如式(25)所示:

$$\begin{bmatrix} P-NL^{-1}Q \\ Q-MH^{-1}P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ U \end{bmatrix}, \quad (25)$$

其中:

$$\begin{aligned} H &= H-NL^{-1}M, \\ L &= L-MH^{-1}N. \end{aligned}$$

根据式(25),节点电压幅值、相角的表达式如下:

$$U = L^{-1}Q - L^{-1}MH^{-1}P, \quad (26)$$

$$\theta = H^{-1}P - H^{-1}NL^{-1}Q. \quad (27)$$

1.3 概率潮流计算方法

由GMM的线性不变性可知,如果随机变量 X 服从高斯分布, Y 为 X 的线性变换, $Y=C+AX$,则 Y 经过线性变换后也服从高斯分布。式(26)表示节点电压幅值 U 为节点注入有功功率 P 和节点注入无功功率 Q 的线性函数,因此,为得到节点电压幅值 U 关于节点注入有功功率 P 的线性表达式,需要对节点注入无功功率 Q 进行处理。本章模型同时考虑了分布式光伏以及负荷的不确定性,在不考虑光伏逆变器无功调控的情况下,可将分布式光伏无功功率视为0,此时节点注入有功功率 P 同时受到分布式光伏有功出力以及负荷有功功率的影响,而节点注入无功功率 Q 仅取决于负荷无功功率,节点功率因数角变化较大,无法以节点注入有功功率 P 乘以功率因数角的正切值表示节点注入无功功率 Q 。考虑到配电台区 R/X 比较高,台区节点电压受到有功功率影响大于无功功率,且台区内同一节点无功功率变化较小,因此可以用节点负荷无功功率历史数据均值来近似表示节点注入无功功率 Q 。由此可以得到节点注入有功功率 P 的线性变换 U 。由于节点注入有功功率 P 是基于GMM建模所得,在经过配电网线性化潮流模型中的线性变换后,节点电压 U 也服从GMM,同理可知,线路潮流亦服从GMM^[16-19]。

综上所述,采用如式(28)所示一般化的方程描述概率潮流中节点电压和线路功率等与节点注入

有功功率之间的函数关系:

$$Y = C + AX, \quad (28)$$

式中: X 表示节点注入有功功率; Y 表示节点电压幅值、相角和线路有功功率等变量; C 和 A 分别表示常数相量与矩阵。

以节点电压幅值为例进行推导验证,节点电压的幅值服从高斯分布,其均值相量为 $A\mu_m+C$,协方差矩阵为 $A\sigma_m A^T$,因此节点电压幅值的联合概率密度函数可表示为:

$$f_Y(y) = \sum_{m=1}^M \omega_m N_m(y), \quad (29)$$

$$N_m(y) = \frac{\exp\left[-\frac{1}{2}(y-A\mu_m-C)^T(A\sigma_m A^T)^{-1}(y-A\mu_m-C)\right]}{(2\pi)^{M/2} \det(A\sigma_m A^T)^{1/2}}. \quad (30)$$

对式(30)进行多重积分后,可得到节点电压幅值的累计分布函数:

$$f_Y(y) = \sum_{m=1}^M \omega_m \phi_m(y), \quad (31)$$

式中: $\phi_m(y)$ 为 $N_m(y)$ 的多重积分,其表达式为:

$$\phi_m(y) = \int \cdots \int_{-\infty}^{\infty} N_m(y) dy_1 \cdots dy_w. \quad (32)$$

2 分布式光伏接入影响量化评估

2.2 分布式光伏接入影响量化评估指标

2.2.1 电压越限风险指标

针对分布式光伏接入影响展开研究,既需要考虑由于负荷过大造成的节点电压越下限情况,也需要考虑因光伏接入导致的节点电压越上限情况。为体现两种情况的区别,将节点电压越限风险指标分为节点电压越上限指标和节点电压越下限指标,具体计算公式如下:

$$I_{dx_{UO}} = \sum_{s=1}^K \frac{Sev_{UO}(U_{s,max})}{K}, \quad (33)$$

$$I_{dx_{UB}} = \sum_{s=1}^K \frac{Sev_{UB}(U_{s,min})}{K}, \quad (34)$$

式中: K 为抽样的总样本容量; s 为抽样次数; $U_{s,max}$ 为节点电压上限; $U_{s,min}$ 为节点电压下限; $Sev_{UO}(U_{s,max})$ 和 $Sev_{UB}(U_{s,min})$ 分别为节点电压越上限和越下限的严重程度函数,用于描述节点电压越限的严重程度,其定义如式(35)和式(36)所示:

$$Sev_{UO}(U_{s,max}) = \begin{cases} e^{U_{s,max}^{-1}} - 1, & U_{s,max} \geq 1 \\ 0, & U_{s,max} < 1 \end{cases}, \quad (35)$$

$$U_{s,max} = \max\left\{\frac{U_{s,1}}{U_{OV}}, \frac{U_{s,2}}{U_{OV}}, \cdots, \frac{U_{s,N}}{U_{OV}}\right\}, \quad (36)$$

$$Sev_{UB}(U_{s,\min}) = \begin{cases} e^{U_{s,\min}^{-1}} - 1, & U_{s,\min} \geq 1 \\ 0, & U_{s,\min} < 1 \end{cases}, \quad (37)$$

$$U_{s,\min} = \max\left\{\frac{U_{UV}}{U_{s,1}}, \frac{U_{UV}}{U_{s,2}}, \dots, \frac{U_{UV}}{U_{s,N}}\right\}, \quad (38)$$

式中: $U_{s,i}$ ($i=1,2,\dots,N$) 为第 s 次抽样时节点 i 的电压幅值; U_{OV} 和 U_{UV} 分别为和节点电压允许上限值和下限值。

2.2.2 潮流越限风险指标

支路潮流未超过热稳定极限时,潮流对支路停运概率几乎不产生影响。若支路潮流超过允许范围,则线路过电流和过负荷保护装置动作。保护动作的时间和潮流越限程度成反比,潮流越限程度越高,则使其恢复至允许限度内的可能性就越低,线路停运的概率便越大。由于线路停运会造成失负荷,从而影响经济效益,因此有必要在含有大规模分布式光伏配电网的风险评估中建立支路潮流越限风险指标。

潮流越限风险指标计算公式如下所示:

$$I_{dx,B} = \sum_{s=1}^K \frac{Sev_B(P_{s,\max})}{K}, \quad (39)$$

式中: $P_{s,\max}$ 支路潮流最大值; $Sev_B(P_{s,\max})$ 为支路潮流越限的严重度函数,用于描述支路潮流越限的严重程度,其定义如式(40)所示:

$$Sev_B(P_{s,\max}) = \begin{cases} e^{P_{s,\max}^{-1}} - 1, & |P_{s,\max}| \geq 1 \\ 0, & |P_{s,\max}| < 1 \end{cases}, \quad (40)$$

$$P_{s,\max} = \max\left\{\frac{|P_{s,1}|}{P_{i,OV}}, \frac{|P_{s,2}|}{P_{i,OV}}, \dots, \frac{|P_{s,L}|}{P_{i,OV}}\right\}, \quad (41)$$

式中: $P_{s,i}$ ($i=1,2,\dots,L$) 为第 s 次抽样时线路 i 中流动的有功功率; L 为配电台区线路总数; $P_{i,OV}$ 为线路 i 的额定输送功率。

2.2.3 节点电压偏差指标

节点电压偏差指标数值大小能够描述配电台区中节点电压的分布情况,节点电压偏差指标越小,表明配电台区中节点电压分布越集中,电能质量较佳。

节点电压偏差指标计算公式如下所示:

$$I_{dx,D} = \sqrt{\frac{1}{N(K-1)} \sum_{s=1}^K \sum_{i=1}^N (U_{s,i} - \bar{U}_s)^2}, \quad (42)$$

式中: \bar{U}_s 为第 s 次抽样时配电台区节点电压的平均值。

2.2.4 线路损耗指标

由于负荷和分布式光伏出力都采用概率模型描述,传统有功损耗表达方式难以描述概率潮流有功损耗,给出系统近似有功损耗表达式如下所示:

$$I_{dx,L} = \sum_{s=1}^K \sum_{i=1}^{N_L} R_k \left(\frac{P_{s,i}^2 + Q_{s,i}^2}{U_{base}} \right), \quad (43)$$

式中: N_L 为配电台区支路总数; R_k 为连接节点 i 和节点 j 的支路 k 的电阻; U_{base} 为台区基准电压。

2.3 分布式光伏接入影响量化评估流程

综上所述,所提分布式光伏接入影响量化评估流程如下:

第1步:输入评估所需原始数据,包括配电台区系统参数、负荷历史数据、太阳辐照强度历史数据、需要评估的分布式光伏接入方案等;

第2步:根据太阳辐照强度历史数据、分布式光伏接入位置及容量计算得到节点注入功率历史数据;

第3步:由节点注入功率历史数据形成节点注入功率的GMM;

第4步:进行概率潮流计算,得到节点电压、支路潮流的概率分布函数;

第5步:根据分布函数生成个样本;

第6步:计算配电网潮流越限风险量化评估指标值。

3 算例分析

为验证配电网潮流越限风险量化评估方法对实际内蒙古配电网的适用性,采用内蒙古 YSW 变电站下辖配电网拓扑建立仿真算例模型,YSW 变电站 10 kV 母线下接四条主支路,分别为 MS 线、YH 线、SJT 线以及水泥一回线,将原始电网拓扑简化,得到如图 1 所示 YSW149 节点配电网拓扑图,基准电压 12.66 kV,线路型号为 JKLYJ-120 低压架空绝缘导线,每段线路长度均为 500 m,其单位长度阻抗为 $0.253+j0.343 \Omega/\text{km}$,导线长期允许载流量为 352 A,变压器容量为 40 MVA。

太阳辐照强度和总负荷功率的标么值如图 1 所示,设置以下 4 种场景对比分析:

场景 1:无分布式光伏接入,为基础场景;

场景 2:各节点平均接入光伏,每个节点接入光伏容量 100 kW;

场景 3:各节点平均接入光伏,每个节点接入光

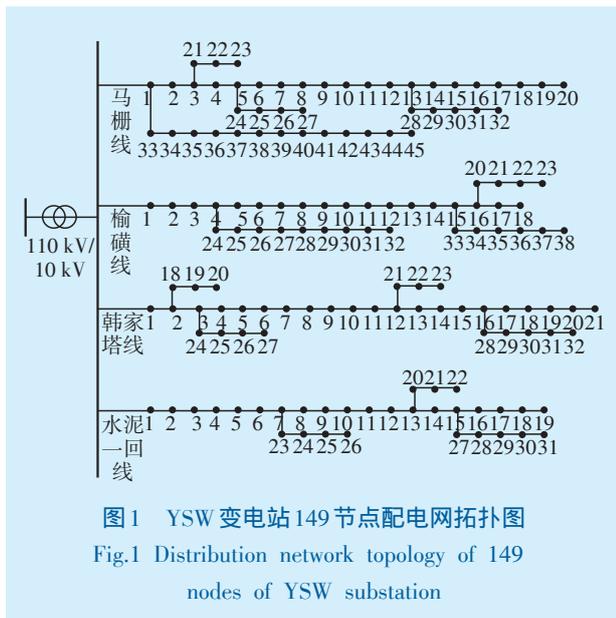


图1 YSW变电站149节点配电网拓扑图
Fig.1 Distribution network topology of 149 nodes of YSW substation

伏容量 200 kW;

场景4:各节点平均接入光伏,每个节点接入光伏容量 300 kW;

通过计算得到4种场景下的分布式光伏消纳能力评估指标,结果如表1所示。

表1 各方案指标计算结果

Tab.1 Calculation results of various scheme indicators

场景	电压越下限 风险指标 I_{dxl}	电压越上限 风险指标 I_{dxu}	潮流越限 风险指标 I_{dxc}	节点电压 偏差指标 I_{dxp}	变压器过载 风险指标 I_{dxt}
场景1	0.055 1	0	0	13.650 8	0
场景2	0.008 8	0	0	9.855 3	0.003 1
场景3	0.001 9	0.000 2	0.000 1	7.832 9	0.009 4
场景4	0.001 4	0.030 6	0.020 8	8.918 4	0.115 4

表1中计算结果做出以下分析:

(1) 对于电压越下限风险指标,随着分布式光伏接入容量增大,配电网电压越下限概率逐渐减小;

(2) 对于电压越上限风险指标,场景1、2、3中未接入光伏或接入容量较小,因此该项指标为0或较小;随着光伏接入容量的增大,场景4中出现较大电压越上限风险。

(3) 对于潮流越限风险概率,随着分布式光伏接入容量的增大,导致电网出现潮流返送,产生潮流越限风险。

(4) 对于节点电压偏差指标,分布式光伏出力能够在一定程度上平衡节点负荷,使得节点电压偏差降低。

(5) 对于变压器过载风险概率,随着分布式光伏接入容量增大,负荷难以消纳光伏出力,导致配

电网出现了严重潮流返送,变压器存在反向过载风险。

4 结论

本文研究了基于GMM的配电网概率潮流算法,在此基础上提出了分布式光伏接入影响量化评估方法,并得出以下结论:

(1) 根据配电网节点负荷功率历史数据、太阳辐照强度历史数据以及电网内光伏安装情况或接入方案能够生成节点注入功率的GMM,通过线性化潮流计算能够快速得到节点电压幅值、支路有功功率等电气量的概率密度函数,从而对分布式光伏接入影响进行评估;

(2) 分布式光伏的接入位置和接入容量变化对配电网的影响也会发生变化,当光伏集中接入配电网线路首端时,对配电网节点电压越限风险、支路潮流越限风险较小;当光伏集中接入配电网线路末端时,对配电网节点电压越限风险、支路潮流越限风险、电压偏差和网损等都会造成较大不利影响;当分布式光伏以较大容量接入时,配电网出现越限的风险也会增大,因此实际接入分布式光伏时,应合理规划容量和位置。

参考文献:

[1] 唐越,向小民,危杰,等.分布式光伏接入电网对配电网网损的影响研究[J].电功率,2018,33(4):301-306.
TANG Yue, XIANG Xiaomin, Wei Jie, et al. Distributed photovoltaic access to the power grid to the distribution network loss[J]. Journal of Electric Power, 2018, 33(4): 301-306.

[2] 曾惜,王元峰,刘畅,等.基于网损的分布式光伏并网容量匹配策略的研究[J].机电工程技术,2018,47(8):160-162,249.
ZENG Xi, WANG Yuanfeng, LIU Chang, et al. Grid connection of distributed photovoltaic based on network loss Research on capacity matching Strategy[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2018, 47(8): 160-162, 249.

[3] 何洛滨.含分布式电源的配电网可靠性建模与供电可靠性研究[D].北京:北京交通大学,2018.

[4] 张曦,康重庆,张宁,等.太阳能光伏发电的中长期随机特性分析[J].电力系统自动化,2014,38(6):6-13.
ZHANG Xi, KANG Chongqing, ZHANG Ning, et al. Analysis of medium and long term stochastic characteristics of solar photovoltaic power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 6-13.

[5] 随新鲜.计及分布式电源的配电网的可靠性及其经济性研究[D].

- 成都:西南交通大学,2010.
- [6] 丁少倩,林涛,翟学,等.基于短路容量的含大规模新能源接入的电网状态脆弱性评估方法研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(13):40-47.
DING Shaoqian, LIN Tao, ZHAI Xue, et al. Based on short circuit capacity containing large - scale new energy access Research on Vulnerability Assessment Method of power grid state[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 40-47.
- [7] Singh R, Pal B C, Jabr R A. Statistical Representation of Distribution System Loads Using Gaussian Mixture Model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 29-37.
- [8] Nijhuis M, Gibescu M, Cobben S. Gaussian Mixture Based Probabilistic Load Flow For LV - Network Planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 2878-2886.
- [9] Singh R, Pal B C, Jabr R A. Statistical Representation of Distribution System Loads Using Gaussian Mixture Model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 29-37.
- [10] 田蓓,于珍,李旭涛,等.考虑多风电场功率相关性的概率潮流联合分布计算[J].中国电力,2017(10):71-77.
TIAN Bei, YU Zhen, LI Xutao, et al. Probabilistic power flow joint distribution calculation considering power dependence of multiple wind farms[J]. Electric Power, 2017 (10): 71-77.
- [11] 陈鹏伟,陶顺,肖湘宁,等.主动配电网可靠性评估源荷模型改进及并行处理[J].电力系统自动化,2016,40(18):68-75.
CHEN Pengwei, TAO Shun, XIAO Xiangning, et al. Improvement and Parallel Processing of source-load Model for Reliability Evaluation of Active Distribution Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 68-75.
- [12] 卢锦玲,初文奇,於慧敏,等.基于需求侧响应的主动配电网多源协调优化调度[J].电力科学与工程,2018,34(11):30-37.
LU Jinling, CHU Wenqi, YU Huimin, et al. Multi - source coordinated optimal dispatch for active distribution network based on demand - side response[J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34 (11): 30-37.
- [13] 丁明,徐志成,赵波,等.考虑云层影响的大型光伏发电系统辐照强度计算模型[J].中国电机工程学报,2015,35(17):4291-4299.
DING Ming, XU Zhicheng, ZHAO Bo, et al. Irradiation intensity calculation model for large-scale photovoltaic power generation system considering Cloud Influence[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4291-4299.
- [14] 徐青山,臧海祥,卞海红.太阳辐射实用模型的建立与可行性研究[J].太阳能学报,2011,32(8):1180-1185.
XU Qingshan, ZANG Haixiang, BIAN Haihong. Establishment and feasibility study of practical solar radiation model[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(8): 1180-1185.
- [15] 蔡永翔.促进高比例分布式光伏消纳的配电网运行控制技术[D].北京:中国农业大学,2019.
- [16] 王文倬,谢丁,谢醉冰,等.考虑集群划分的分布式光伏无功电压控制策略[J].浙江电力,2024,43(7):64-75.
- [17] 陈卓,郭寅远,温彦军,等.基于广义Benders分解的分布式光伏接入容量规划方法[J].浙江电力,2024,43(6):31-40.
CHEN Zhuo, GUO Yinyuan, WEN Yanjun, et al. An integration capacity planning method for distributed photovoltaic sources based on generalized Benders decomposition[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(6): 31-40.
- [18] 阮永丽,李兴龙,海迪,等.分布式光伏并网造成的配电台区电压问题治理方法探索[J].云南电力技术,2024,52(3):3-6.
RUAN Yongli, LI Xinglong, HAI Di, et al. Integration of Distributed Photovoltaic Access and Low Voltage and Heavy Load Control in Rural Distribution Network[J]. Yunnan Electric Power, 2024, 52(3): 3-6.
- [19] 周涛,杨剑锋,朱世坤.基于DMPC算法的分布式光伏并网调压控制[J].电网与清洁能源,2024,40(5):86-95.
ZHOU Tao, YANG Jianfeng, ZHU Shikun. Distributed Photovoltaic Grid-Connected Voltage Regulation Control Based on Cluster Partitioning DMPC algorithm[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2024, 40(5): 86-95.

编辑 张俊英

[收稿日期] 2024-06-24

[作者简介] 王立强(1994)男,内蒙古人,硕士,工程师,从事新能源并网技术研究工作。E-mail: wangliqiang2121@163.com

刘鸿清(1994)男,山西人,硕士,工程师,从事新能源并网技术研究工作。E-mail: windforceog@foxmail.com

丛雨(1983)男,山东人,硕士,高级工程师,从事新能源并网技术研究工作。E-mail: 598111313@qq.com