

DOI: 10.7667/PSPC160503

考虑多重不确定参数的配电网概率无功优化

尹青, 杨洪耕, 马晓阳

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对同一区域内多个分布式电源及波动负荷的随机性和相关性对配电网模型带来的多重不确定性, 构建了考虑多重不确定参数的概率无功优化模型, 并将其转化为多场景确定性优化问题求解。模型中, 三阶多项式正态变换(TPNT)改进的 Nataf 变换解耦了分布式发电机组和波动负荷的相关性, Gaussian-Hermite 积分法处理了目标函数和约束项涉及的概率潮流计算。所建模型使用多策略融合粒子群优化算法进行优化求解, 得到确定的控制变量最优解和状态变量统计矩。将该模型应用于接入多个分布式光伏发电机组和波动负荷的 IEEE33 节点配电系统进行仿真测试, 其结果验证了所提概率无功优化模型和解法的适应性和有效性。

关键词: 分布式电源; 波动负荷; 概率无功优化; Nataf 变换; 三阶多项式正态变换; Gaussian-Hermite 积分

Probabilistic reactive power optimization for distribution network considering multiple uncertainties

YIN Qing, YANG Honggeng, MA Xiaoyang

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Randomness and correlation of multiple distributed generators and fluctuating loads in close proximity brings multiple uncertainties to the model of distribution network. In allusion to the problem, a probabilistic reactive power optimization model considering multiple uncertainties is built and solved as a multi-scene deterministic optimization problem. In the model, third-order polynomial normal transformation (TPNT) simplified Nataf transformation is used to decouple correlation of distributed generators and fluctuating loads, and Gaussian-Hermite integration method is used for probabilistic power flow calculation in objective functions and constraints. The model is optimized by MSI-PSO, and a certain optimal scheme of control variables and statistical moments of state variables are achieved. The simulation is carried out on IEEE 33-bus system with multiple photovoltaic generators and fluctuating loads, and the result verifies the adaptability and availability of the proposed model and strategy for probabilistic reactive power optimization.

Key words: distributed generators; fluctuating loads; probabilistic reactive power optimization; Nataf transformation; third-order polynomial normal transformation; Gaussian-Hermite integration

0 引言

无功优化可以改善电网电压分布, 减少网络有功损耗, 是提升电网运行安全性和经济性的重要手段。随着电力工业的发展, 分布式电源和波动负荷在电网中渗透率不断增大, 越发突显了电源、负荷与电网之间的互动性, 也导致电力系统的不确定性显著增加。在这样的条件下, 传统的确定性无功优化条件已不再满足, 需要讨论不确定参数下无功优化的方法。

针对接入分布式电源和波动负荷的无功优化模型, 文献[1-2]仅考虑分布式电源提供无功功率的能力, 而忽略其为电网提供有功功率的事实; 文献[3]

仅考虑分布式电源提供的有功功率, 优化模型中未计及其无功功率; 文献[4-6]以日负荷及分布式发电曲线分段为基础, 通过各时段的无功优化计算, 制定一天内的计划, 对不确定性考虑并不充分; 文献[7-8]采用场景分析法处理风电机组接入配电网的无功优化, 仅仅考虑额定, 欠额定和零输出三种场景难以反映风机输出的随机性。文献[9]以负荷正态分布特性为基础, 利用负荷分段和概率组合, 提出计及负荷不确定性影响的无功优化模型和算法; 文献[10]引入区间数和区间运算, 提出一种基于区间潮流模型的含分布式电源的电网无功优化方法; 文献[11]采用随机响应面法(SRSM)进行了计及风电场概率模型的多目标无功优化; 文献[12]以离散采样

和场景组合为基础,采用一种结合传统解析法的基于全概率公式的计算方法处理模型所涉及的随机潮流问题;文献[13]利用基于拉丁超立方采样的蒙特卡罗法和场景缩减技术处理了风电机组无功优化中的随机性问题。

以上文献大都集中在某一不确定参数对无功优化影响的研究,未综合考虑接入同一区域的多个分布式电源和波动负荷的随机性和相关性带来的多重不确定性影响。因此,本文同时考虑了分布式光伏发电机组和波动负荷的影响,将概率潮流计算结合到无功优化模型中,构建考虑多重不确定参数的概率无功优化模型。在考虑多重不确定参数的概率潮流计算中,利用 Gaussian-Hermite 积分法获取标准正态空间上的积分点及对应的权重系数,结合三阶多项式正态变换(Third-order Polynomial Normal Transformation, TPNT)简化等效相关系数(Equivalent Correlation Coefficient, EEC)的计算,再经由 Nataf 逆变换求得原始空间的多积分点,实现独立标准正态随机变量到相关非正态随机变量的转换,将不确定性潮流问题求解转化为多随机变量响应函数求解。在无功优化模型中,以有功网损和电压偏移为目标函数,利用多策略融合粒子群优化算法^[14]求解得到确定的控制变量最优解和状态变量统计矩。在接入多个分布式光伏发电机组和波动负荷的 IEEE33 节点配电系统进行仿真测试,结果验证了所提概率无功优化模型和解法的适应性和有效性。

1 不确定参数模型

分布式电源及波动负荷的不确定性可以用相应的概率模型进行描述,处理为随机变量概率模型。

1.1 光伏发电概率模型

数据统计表明,一定时段内太阳光照强度近似服从 Beta 分布,因而光伏发电机组输出功率也呈 Beta 分布,其概率密度可表达为^[15]

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

式中: P_{pg} 和 P_{max} 分别为光伏发电机组实际输出功率和最大输出功率; α 和 β 为形状系数。

假设光伏发电机组工作于恒功率因数方式下,则有

$$Q_{pg} = P_{pg} \tan \theta_{pg} \quad (2)$$

式中: P_{pg} 和 Q_{pg} 分别为光伏发电机组有功功率和无功功率; θ_{pg} 为光伏发电机组功率因数角。

实际中光伏发电机组的功率因数一般在 0.85~1.0。

1.2 负荷功率概率模型

通常情况下考虑负荷为确定值,然而电力系统量测、估计等误差以及冲击负荷作用,导致负荷具有随机性,可用正态分布近似反映^[16]。

$$f(P_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(P_L - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

式中: P_L 为负荷实际消耗的有功功率; μ 为负荷期望值; σ 为负荷标准差。

假设负荷为恒功率因数负荷,则

$$Q_L = P_L \tan \theta_L \quad (4)$$

式中: Q_L 为负荷实际消耗的无功功率; θ_L 为负荷功率因数角。

2 多重不确定参数的概率潮流模型

由于多个随机变量间的相关性影响了概率潮流的求解,本文采用 TPNT 改进的 Nataf 变换进行了变量之间相关性的解耦,然后采用 Gaussian-Hermite 积分法进行概率潮流计算。

2.1 Nataf 变换

建立在 Nataf 分布理论基础上的 Nataf 变换^[17]可以建立一个从任意原始变量空间到独立标准正态空间的转换模型,从而有效处理输入变量的相关性。

设服从任意分布类型的 n 维随机变量向量为 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, 且已知 x_i 边缘分布函数为 $F_i(x_i)$, 均值为 μ_{x_i} , 标准差为 σ_{x_i} , 记 x_i 间相关系数矩阵为 \mathbf{C}_x ; 设 x 变换后所得相关标准正态分布向量为 $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$, 且 y_i 边缘分布函数 $\Phi(y_i)$ 服从正态分布规律。

根据等概率转换原则可得

$$\begin{cases} \Phi(y_i) = F_i(x_i) \\ x_i = F_i^{-1}(\Phi(y_i)) \end{cases} \quad (5)$$

记 ρ_{ij} 为原始随机变量相关系数矩阵 \mathbf{C}_x 中的元素, ρ_{0ij} 为待求 EEC 矩阵 \mathbf{C}_y 中对应元素, 则有如式(6)关系。

$$\rho_{ij} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{F_i^{-1}(\Phi(y_i)) - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \right) \cdot \left(\frac{F_j^{-1}(\Phi(y_j)) - \mu_{x_j}}{\sigma_{x_j}} \right) \cdot \phi_2(y_i, y_j, \rho_{0ij}) dy_i dy_j \quad (6)$$

式中: $F_i^{-1}(\cdot)$ 为 $F_i(\cdot)$ 的反函数; $\phi_2(\cdot)$ 为具有相关系数 ρ_{0ij} 的标准正态随机变量 y_i 和 y_j 的联合概率密度函数。

利用 Cholesky 因子分解法处理对称矩阵 C_y , 得到 $C_y = BB^T$, 其中 B 为下三角矩阵; 由 $Z = B^{-1}Y$ 完成相关标准正态变量 Y 到独立标准正态变量 Z 的转换。

同理 Nataf 逆变换过程为

$$X = F^{-1}(\Phi(Y)) = F^{-1}(\Phi(BZ)) = N^{-1}(Z) \quad (7)$$

式中, $N^{-1}(\cdot)$ 表示 Nataf 逆变换。

求取由输入原始随机变量相关系数矩阵 C_x 变换得到的标准正态变量等效相关系数(EEC)矩阵 C_y 是 Nataf 变换的唯一难点, 对未给出经验公式^[18]的分布, 常采用迭代法^[19]进行求解, 其过程繁琐耗时, 在此利用三阶多项式变换(TPNT)模拟简化 EEC 计算。

2.2 基于 TPNT 的 EEC 获取

多项式正态变换^[20]用于求取非正态随机变量的分布, 效果不受大多数工程应用概率分布类型的影响, 具有普适性。综合考虑变换的计算精度和复杂程度, 广泛采用三阶多项式正态变换(TPNT)。

用标准正态分布随机变量 y_i 的三阶多项式表示某一任意分布随机变量 x_i :

$$x_i = a_{0,i} + a_{1,i}y_i + a_{2,i}y_i^2 + a_{3,i}y_i^3 \quad (8)$$

式中, $a_{0,i}, a_{1,i}, a_{2,i}, a_{3,i}$ 为变换系数。

通过线性矩(L-moments, LM)求解待定的变换系数 $a_{0,i}, a_{1,i}, a_{2,i}, a_{3,i}$ 。

令随机变量 x_i 的 r 阶概率加权矩(Probability Weighted Moments, PWM)为 $\beta_{r,i}$ 。

$$\beta_{r,i} = E(x_i F(x_i)^r) \quad (9)$$

式中: $E(\cdot)$ 为随机变量期望函数; $F(\cdot)$ 为随机变量累积分布函数。

则前四阶 LM 为

$$\begin{cases} \lambda_{1,i} = \beta_{0,i} \\ \lambda_{2,i} = 2\beta_{1,i} - \beta_{0,i} \\ \lambda_{3,i} = 6\beta_{2,i} - 6\beta_{1,i} + \beta_{0,i} \\ \lambda_{4,i} = 20\beta_{3,i} - 30\beta_{2,i} + 12\beta_{1,i} - \beta_{0,i} \end{cases} \quad (10)$$

由此可得变换系数为

$$\begin{cases} a_{0,i} = \lambda_{1,i} - 1.81379937\lambda_{3,i} \\ a_{1,i} = 2.25518617\lambda_{2,i} - 3.93740250\lambda_{4,i} \\ a_{2,i} = 1.81379937\lambda_{3,i} \\ a_{3,i} = -0.19309293\lambda_{2,i} + 1.574961\lambda_{4,i} \end{cases} \quad (11)$$

经过变换, 相应的相关系数也发生改变, 通过代数方程求得满足条件的解, 即为基于 TPNT 计算得到的 EEC。

$$\begin{aligned} & 6a_{3,i}a_{3,j}\rho_{1ij}^3 + 2a_{2,i}a_{2,j}\rho_{1ij}^2 + (a_{1,i} + 3a_{3,i}) \cdot \\ & (a_{1,j} + 3a_{3,j})\rho_{1ij} + [(a_{0,i} + a_{2,i}) \cdot (a_{0,j} + \\ & a_{2,j}) - \rho_{ij}\sigma_{x_i}\sigma_{x_j} - \mu_{x_i}\mu_{x_j}] = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $-1 \leq \rho_{1ij} \leq 1$; $\rho_{1ij}\rho_{ij} \geq 0$ 。

由式(12)解得的 ρ_{1ij} 与 ρ_{0ij} 相差很小, 可直接作为 Nataf 变换中的 EEC。本文直接用 TPNT 得到的 EEC 组成 C_y 进行后续求解。该简化算法不依赖于具体边缘分布函数形式, 仅使用输入量前四阶矩, 计算简便, 也具有通用性。

2.3 Gaussian-Hermite 积分法

求解概率无功优化问题, 主要关注输出变量统计矩中期望和方差的准确估计, 因此综合考虑求解效率和精度, 采用 3 积分点的 Gaussian-Hermite 积分法进行概率潮流计算。

参考文献[21]中多变量响应函数的逼近算法, 含多随机变量输入的概率潮流方程可近似表示为

$$\begin{cases} G(x) \approx G^*(x) = G_\mu + \sum_{i=1}^n (G_i - G_\mu) \\ G_i = G(N^{-1}(Z_i)) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $G(\cdot)$ 为含多随机变量的概率潮流方程; G_μ 为所有随机变量取期望值时的潮流方程; Z_i 为仅第 i 个变量 x_i 为随机变量, 其他变量均取期望值时输入随机向量在独立标准正态空间的映射; G_i 为关于 Z_i 的潮流方程。

由以上概率潮流方程表达式, 可得输出变量统计矩为

$$\begin{cases} \mu_G = G_\mu + \sum_{i=1}^n (\mu_{G_i} - G_\mu) \\ \sigma_G^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_{G_i}^2 \\ \mu_{G_i} = \sum_{j=1}^3 P_{ij} G(N^{-1}(Z_{ij})) \\ \sigma_{G_i}^2 = \sum_{j=1}^3 P_{ij} (G(N^{-1}(Z_{ij})) - \mu_{G_i})^2 \end{cases} \quad (14)$$

式中: μ_G 和 σ_G 分别为关于函数 G 的输出变量期望值和标准差; Z_{ij} 为第 i 个随机变量取第 j 个估计点 z_{ij} 而其他变量均取期望值时在独立标准正态空间对应的样本向量; P_{ij} 为 Z_{ij} 对应的权重系数; μ_{G_i} 和 σ_{G_i} 分别为关于 Z_{ij} 的输出变量期望值和标准差。

采用 3 积分点 Gaussian-Hermite 积分对含 n 个输入随机变量的潮流方程进行输出变量统计矩的计

算, 需要 $3n$ 个估计点, 理论上对应 $3n$ 次确定性潮流计算, 但其中有 n 次潮流计算在各变量均取期望值时进行, 因此实际进行 $2n+1$ 次潮流计算。

3 概率无功优化模型

分布式发电机组和波动负荷的接入改变了网络的潮流分布, 影响无功设备的动作, 为无功优化带来不确定性。概率无功优化模型充分考虑了上述不确定参数影响, 将概率潮流算法引入无功优化模型进行优化求解, 得到确定的控制变量最优解以及相应的状态变量统计矩。

3.1 目标函数

$$\begin{cases} \min f_{\text{loss}} = \sum_{i \in N_b, j \in N_i} G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \\ \min f_{\text{dv}} = \sum_{i=1}^{N_b} \left(\frac{V_i - V_{i\text{ref}}}{V_{i\text{max}} - V_{i\text{min}}} \right)^2 \end{cases} \quad (15)$$

式中: f_{loss} 为有功网损函数; f_{dv} 为电压偏移函数; N_b 为母线总数; N_i 为与节点 i 相邻节点的集合; V_i 和 V_j 分别为节点 i 和 j 处电压幅值; G_{ij} 为节点 i 与 j 之间线路的电导; θ_{ij} 为节点 i 与 j 电压间相差角; $V_{i\text{ref}}$, $V_{i\text{max}}$ 和 $V_{i\text{min}}$ 分别为节点电压基准值及其上下限。

3.2 约束条件

等式约束为

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (16)$$

式中: P_i 和 Q_i 分别为节点 i 处注入的有功功率和无功功率; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点 i 与 j 之间线路的电导和电纳; θ_{ij} 为节点 i 与 j 电压间相差角; V_i 和 V_j 为节点 i 和 j 处电压幅值。

不等式约束为

$$\begin{cases} V_{i\text{min}} \leq V_i \leq V_{i\text{max}} \\ C_{i\text{min}} \leq C_i \leq C_{i\text{max}} \\ T_{i\text{min}} \leq T_i \leq T_{i\text{max}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $V_{i\text{max}}$ 和 $V_{i\text{min}}$ 分别为节点 i 处电压的上下限; $C_{i\text{max}}$ 和 $C_{i\text{min}}$ 分别为节点 i 处无功补偿上下限; $T_{i\text{max}}$ 和 $T_{i\text{min}}$ 分别为节点 i 处变压器分接头上下限。

3.3 算法流程

1) 输入原始数据。录入电网结构参数、波动负荷模型参数、光伏发电模型参数以及算法参数等。

2) 初始化粒子群。按照控制变量要求设定粒子群规模、粒子位置、个体速度和全局极值等。

3) 粒子适应度计算。进行多重不确定参数的概率潮流计算, 以有功网损和电压偏差的期望和方差

最优为目标函数, 得到各目标函数值, 计算粒子适应度。

4) 更新粒子。进行适应度比较和排序, 更新粒子极值参数、粒子个体参数以及算法参数。

5) 判定。如果满足结束条件(误差绝对值或最大循环次数)则优化结束, 得到最优输出变量统计矩以及最优控制变量确定值, 否则返回 3) 循环。

4 算例分析

4.1 测试系统

仿真算例为接入多个光伏发电机组和波动负荷的 IEEE33 节点测试系统^[22], 具体见图 1 所示。

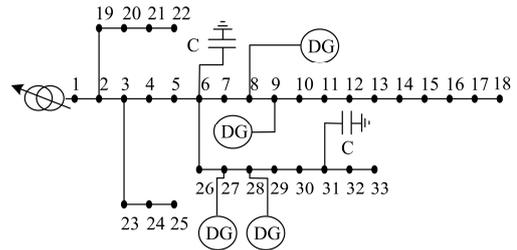


图 1 测试系统示意图

Fig. 1 Sketch map of test system

1) 系统中共接入 4 个光伏发电机组, 分别位于节点 8、9、27 和 28。4 个光伏机组的最大输出功率都为 800 kW, 功率因数均为 0.95, Beta 分布形状系数 $\alpha=0.7003$, $\beta=2.1580$ 。4 个光伏发电机组之间的相关系数矩阵为

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.4 & 0.4 \\ 0.5 & 1 & 0.4 & 0.4 \\ 0.4 & 0.4 & 1 & 0.5 \\ 0.4 & 0.4 & 0.5 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

2) 各正态分布负荷以 IEEE33 系统基态负荷为负荷期望值, 10% 负荷期望值为负荷标准差, 负荷功率因数恒定为基态负荷功率因数, 负荷之间相关系数均设为 0.2。

3) 在母线和节点 1 之间增加一个有载调压变压器, 变比调节范围为 0.9~1.1, 上下分接头数为 ± 8 , 步进量为 0.0125。

4) 在节点 6 和节点 31 处安装可投切并联电容器组 20 组, 每组容量为 50 kvar。

4.2 获取 EEC 性能分析

本文对 Nataf 变换中 EEC 的求取进行了简化, 因而有必要验证 TPNT 与 Nataf 变换 EEC 的逼近效果。在此取简单 Beta 分布进行 TPNT 与 Nataf 变换得到 EEC 逼近效果比较, 并用相对误差 ε 衡量二者的接近程度, 结果如图 2 所示。

$$\varepsilon = \left| \frac{\rho_{ij} - \rho_{0ij}}{\rho_{0ij}} \right| \times 100\% \quad (19)$$

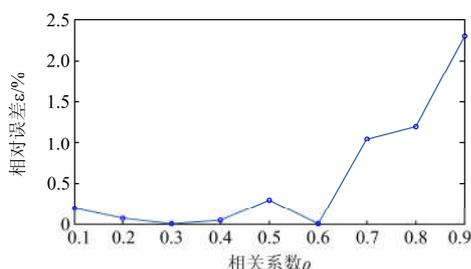


图2 相对误差示意图

Fig. 2 Sketch map of relative errors

由图2分析得: 在 $\rho_{ij} \leq 0.7$ 时, ε 结果显示 TPNT 与 Nataf 变换的 EEC 很接近, 而实际中光伏发电机组间的相关系数普遍低于 0.7, 因而直接以 TPNT 进行 EEC 的简化计算是合理有效的。

4.3 优化方案及结果

对仅接入波动负荷(场景 1)和同时接入波动负荷和分布式光伏发电机组(场景 2)的 IEEE33 节点测试系统, 采用多策略融合粒子群优化算法进行概率无功优化求解, 得到确定的控制变量最优解和状态变量统计矩, 以期望值表征目标函数的优化结果。优化前后各控制变量见表 1, 测试系统优化结果比较见表 2, 两种场景下系统节点电压幅值期望分别见图 3 和图 4。

由优化方案及结果分析得: 接入相关性光伏发电机组后, 即使在优化前, 系统的电压偏移和有功网损期望值都明显低于未接入光伏发电机组的情况, 可见分布式光伏发电机组接入配电网有利于提高网络运行的经济性和安全性; 进行概率无功优化

表 1 优化前后各控制变量取值

Table 1 Value of control variables before and after optimization

场景	项目	T	C_6	C_{31}
场景 1	优化前	0	0	0
	优化后	+4	18	17
场景 2	优化前	0	0	0
	优化后	+4	8	13

表 2 测试系统优化结果比较

Table 2 Optimization results comparison of test system

场景	项目	有功网损/p.u.	减小率 (%)	电压偏移/p.u.	减小率 (%)
场景 1	优化前	0.2316	-	5.82	-
	优化后	0.1413	38.96	1.98	65.98
场景 2	优化前	0.1844	20.35	5.04	13.40
	优化后	0.1381	40.24	1.90	67.35

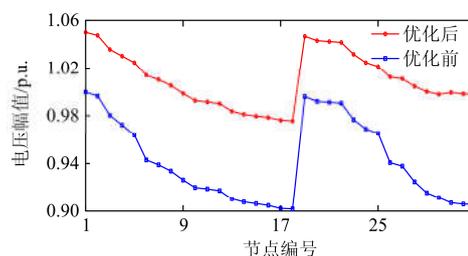


图 3 场景 1 下节点电压幅值期望

Fig. 3 Expectations of nodal voltage amplitude under scene 1

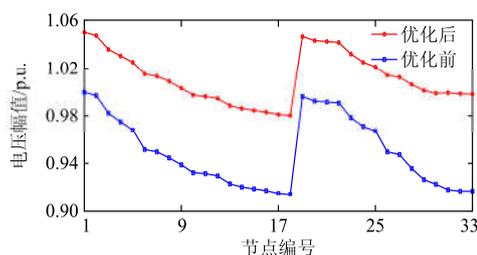


图 4 场景 2 下节点电压幅值期望

Fig. 4 Expectations of nodal voltage amplitude under scene 2

后, 变压器和无功补偿设备的综合作用进一步提高了网络电压, 降低了网络损耗, 且接入光伏发电机组后投入的补偿设备容量明显减少, 证明了本文提出的优化方案是切实有效的。

4.4 不同建模方法对比分析

为了验证本文含多重不确定参数的概率潮流模型对真实情况模拟的有效性, 以及将其应用于概率无功优化对实际系统优化的适应性, 将本文方法与多种概率潮流建模的无优化方法进行对比测试。在接入光伏发电机组和波动负荷的测试系统中, 将本文方法与场景分析法^[12]、蒙特卡罗法^[13]、点估计法^[23]进行概率潮流建模的无功优化方法进行对比分析, 多次测试得各方法优化结果期望值, 其对比分析见表 3。

表 3 不同建模下无功优化方法的对比分析

Table 3 Comparison analysis of different reactive power optimization under different modeling

建模方法	有功网损/p.u.	电压偏移/p.u.	耗时/s
本文方法	0.1381	1.90	36.47
蒙特卡罗法	0.1387	1.92	2529.67
点估计法	0.1322	1.75	28.13
场景分析法	0.1364	1.86	60.53

由表3分析得: 经多次测试统计, 4种建模优化所得结果的误差处于一定范围内, 说明本文和其他3种方法均对含多不确定参数的无功优化问题有一定的有效性和适应性。其中, 本文方法与蒙特卡罗法

所得结果最为接近, 但计算耗时大幅缩短, 仅介于场景分析法与点估计法之间, 因此适合模拟随机波动的负荷和分布式电源的随机变化, 有效处理了多重不确定参数对配电网无功优化带来的问题。

5 结论

1) 利用 Nataf 变换将非标准正态分布变换为标准正态分布, 经过逆变换到原始空间后估计点不会偏移到随机变量定义域外, 保证了采样的可靠性。同时, 结合 TPNT 简化了 Nataf 变换的 EEC 计算, 在处理相关性上提高了计算效率。该变换方法具有通用性, 适用于处理不同概率分布类型的相关性输入量。

2) Gaussian-Hermite 积分法的概率潮流计算在一定的输入量波动范围及相关系数范围内, 均具有较高的计算精度。相对于点估计法能够提供更高的计算精度, 相对于蒙特卡罗法减少了计算时间。

3) 概率无功优化的模型具有不确定性, 用概率统计方法描述输入输出变量的特性, 最终得出确定性的无功设备控制方案。本文方法较好地解决了系统中节点功率的随机性与无功补偿设备投入及变压器分接头调节的确定性间的矛盾, 在不显著增加计算次数与时间的条件下, 更为精确地跟踪电力系统的运行状态及变化趋势, 削弱了不确定性的影响, 其鲁棒性在进行无功优化方面的适用性更广泛。

参考文献

- [1] 张丽, 徐玉琴, 王增平, 等. 包含分布式电源的配电网无功优化[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 168-174.
ZHANG Li, XU Yuqin, WANG Zengping, et al. Reactive power optimization for distribution system with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 168-174.
- [2] 赵晶晶, 符杨, 李东东. 考虑双馈电机风电场无功调节能力的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11): 33-38.
ZHAO Jingjing, FU Yang, LI Dongdong. Reactive power optimization in distribution network considering reactive power regulation capability of DFIG wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11): 33-38.
- [3] 吕忠, 周强, 蔡雨昌. 含分布式电源的 DEIWO 算法配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 69-73.
LÜ Zhong, ZHOU Qiang, CAI Yuchang. Reactive power optimization in distribution network with distributed generation on DEIWO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 69-73.
- [4] 蔡昌春, 张建勇. 计及分布式发电的动态无功优化[J]. 电测与仪表, 2014, 51(6): 39-44.
CAI Changchun, ZHANG Jianyong. Dynamic reactive power optimization with distributed generation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(6): 39-44.
- [5] 初壮, 李晗, 唐丽媛, 等. 含光伏发电的配电网动态无功优化研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(17): 38-43.
CHU Zhuang, LI Han, TANG Liyuan, et al. Research on dynamic reactive power optimization of distribution network with photovoltaic power station[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(17): 38-43.
- [6] 胡晓阳, 王卫平, 王主丁, 等. 一种实用的配电网无功运行两层优化方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 14-21.
HU Xiaoyang, WANG Weiping, WANG Zuding, et al. A practical two-phase optimization method of dynamic var optimization in a distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 14-21.
- [7] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电机组的配网无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 40-45.
CHEN Haiyan, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong. Reactive power optimization in distribution system with wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 40-45.
- [8] 何禹清, 彭建春, 毛丽林, 等. 含多个风电机组的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 37-41.
HE Yuqing, PENG Jianchun, MAO Lilin, et al. Reactive power optimization in distribution system with multiple wind power generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 37-41.
- [9] 谢开贵, 肖畅. 计及负荷不确定性的无功优化模型与算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 18-22.
XIE Kaigui, XIAO Chang. A reactive power optimization model and algorithm considering load uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 18-22.
- [10] 张勇军, 苏杰和, 羿应棋. 基于区间算术的含分布式电源电网无功优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 21-26.
ZHANG Yongjun, SU Jiehe, YI Yingqi. Reactive power optimization based on interval arithmetic with distributed power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 21-26.
- [11] 刘志刚, 刘欢, 柳杰. 计及风电场概率模型的多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 197-203.

- LIU Zhigang, LIU Huan, LIU Jie. Multi-objective reactive power optimization considering wind farm probabilistic model[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 197-203.
- [12] 王淳, 高元海. 基于概率统计的含间歇性分布式发电的配电网无功优化[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1032-1037.
- WANG Chun, GAO Yuanhai. Probability statistics based reactive power optimization of distribution network containing intermittent distributed generations[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 1032-1037.
- [13] 汪文达, 崔雪, 马兴, 等. 考虑多个风电机组接入配电网的多目标无功优化[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1860-1865.
- WANG Wenda, CUI Xue, MA Xing, et al. Multi-objective optimal reactive power flow of distribution network with multiple wind turbines[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1860-1865.
- [14] 陈前宇, 陈维荣, 戴朝华. 电力系统无功优化多目标处理与算法改进[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 129-135.
- CHEN Qianyu, CHEN Weirong, DAI Chaohua. Multi-objective reactive power optimization and improvement of practical swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 129-135.
- [15] KARAKI S H, CHEDID R B, RAMADAN R. Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3): 766-772.
- [16] ZOU K, AGALGAONKAR A P, MUTTAQI K M, et al. Distribution system planning with incorporating DG reactive capability and system uncertainties[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 112-123.
- [17] KIUREGHIAN A D, LIU Peiling. Structural reliability under incomplete probability information[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1986, 112(1): 721-740.
- [18] LIU Peiling, KIUREGHIAN A D. Multivariate distribution models with prescribed marginals and covariances[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1986, 1(2): 105-112.
- [19] 李洪双, 吕震宙, 袁修开. 基于 Nataf 变换的点估计法[J]. 科学通报, 2008, 53(6): 627-632.
- LI Hongshuang, LÜ Zhenzhou, YUAN Xiukai. Nataf transformation based point estimate method[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(6): 627-632.
- [20] CHEN Xingyuan, TUNG Y K. Investigation of polynomial normal transform[J]. Structural Safety, 2003, 25(4): 423-445.
- [21] ZHAO Yangang, ONO T. New point estimates for probability moments[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(4): 433-436.
- [22] 卢扬, 吴俊勇, 郝亮亮. 基于改进 MOBPSO 算法的含分布式电源的多目标配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 62-68.
- LU Yang, WU Junyong, HAO Liangliang. Multi-objective distribution network reconfiguration with distributed generations based on improved MOBPSO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 62-68.
- [23] 邓吉祥, 丁晓群, 张杭, 等. 基于量子人工蜂群算法的风电场多目标无功优化[J]. 电测与仪表, 2015, 52(3): 11-17.
- DENG Jixiang, DING Xiaoqun, ZHANG Hang, et al. Multi-objective reactive power optimization for wind farm based on quantum artificial bee colony algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(3): 11-17.

收稿日期: 2016-04-11; 修回日期: 2016-05-31

作者简介:

尹青(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统无功优化与电压控制; E-mail: qqingyin@126.com

杨洪耕(1949-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电能质量、无功电压控制、智能电网;

马晓阳(1991-), 男, 博士研究生, 研究方向为电能质量控制、大规模风电并网分析与控制。

(编辑 葛艳娜)