

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210072

考虑 DG 不确定性的主动配电网两阶段无功机会约束优化方法

卢 姬¹, 常俊晓¹, 张云阁², 鄂士平³, 曾垂辉³

(1. 国网浙江省电力有限公司台州供电公司, 浙江 台州 318000; 2. 湖北省电力勘测设计院, 湖北 武汉 430000;
3. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430077)

摘要: 随着高比例的分布式电源(Distributed generation, DG)并网, 传统的确定性无功优化方法难以应对 DG 和负荷的双侧不确定性, 提出了主动配电网的两阶段无功机会约束优化方法。首先将配电网潮流方程线性化和松弛, 建立基于混合整数二阶锥的配电网两阶段无功优化模型, 分别在第一阶段优化有载调压变压器、并联电容器等离散控制装置, 在第二阶段考虑 DG 的不确定性优化 DG 的无功出力。然后, 通过场景缩减法来减少机会约束优化方法的场景数。在 95 节点系统的仿真结果表明, 与确定性无功优化方法相比, 所提出的两阶段无功机会约束优化方法能有效地消除安全约束越限问题, 在略微增加网损的情况下获得了较高的鲁棒性。

关键词: 不确定性; 主动配电网; 无功优化; 两阶段机会约束优化; 缩减场景法

Two-stage reactive power chance-constrained optimization method for an active distribution network considering DG uncertainties

LU Ji¹, CHANG Junxiao¹, ZHANG Yunge², E Shiping³, ZENG Chuihui³

(1. Taizhou Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Taizhou 318000, China;
2. Hubei Electric Power Survey and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430000, China;
3. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

Abstract: With the high proportion of Distributed Generation (DG) connected to the grid, traditional deterministic reactive power optimization methods cannot deal with the double-sided uncertainties of DGs and load. This paper proposes a two-stage chance-constrained reactive power optimization method for an active distribution network. First, the power flow equation of the network is linearized and relaxed, and a two-stage reactive power optimization model based on a mixed integer second-order cone is established. In the first stage, discrete control devices such as the on-load tap changer and shunt capacitor are optimized. In the second stage, the uncertainties of DGs are considered to optimize the reactive power output of the DG. Then, a scenario reduction method is used to reduce the number of scenarios of the chance-constrained optimization method. Simulation results of a 95-bus system show that the proposed method can effectively eliminate the problem of security constraint violations, and achieve higher robustness with slightly increased network loss compared with the deterministic reactive power optimization method.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903705).

Key words: uncertainties; active distribution network; reactive power optimization; two-stage chance constrained optimization method; reduced scenario method

0 引言

传统的配电网无功优化是通过合理的无功潮流

分布来维持系统电压水平, 降低网损^[1]。随着大量分散的分布式电源并入传统配电网, 使得传统配电网呈现出潮流双向化、控制复杂化等特点^[2-4], 因此, 含 DG 的主动配电网仅依靠变电站的无功调节能力难以满足电压质量的要求, 还需要综合考虑负荷侧

DG 的无功调节能力^[5-6]。

围绕含 DG 的主动配电网无功优化问题, 国内外大量学者主要从无功优化目标和无功优化方法两个方面进行研究。含 DG 的主动配电网的无功优化目标主要包括配电网网损、电压偏差、无功调节成本等, 因此含 DG 的主动配电网的无功优化分为单目标优化^[7-8]和多目标优化^[9-11]。含 DG 的主动配电网的单目标无功优化主要是以配电网网损或者多个无功优化目标加权和最小为目标, 采用数学规划法和智能优化法求解。文献[12]基于支路潮流(Distflow)构建以全网有功损耗最小为目标的单目标无功优化模型, 通过二阶锥松弛技术将单目标无功优化模型转换为混合整数二阶锥规划(Mixed integer second order cone programming, MISOCP)问题求解。文献[13]在文献[12]构建的混合整数二阶锥无功优化模型的基础上, 通过灵敏度分析得出电压越限节点, 确定无功补偿区域, 实现了动态分区灵活补偿。文献[14-15]均采用遗传算法求解无功多目标加权和最小优化问题, 文献[16]采用自学习迁移粒子群算法求解单目标无功优化问题, 但无论是遗传算法还是改进的粒子群算法都存在全局最优解的收敛性问题。含 DG 的主动配电网的多目标无功优化主要采用多目标智能优化算法求解配电网多目标无功优化模型, 包括多目标粒子群算法(MOPSO)^[17]、多目标进化算法(MOEA)^[18]、非支配排序遗传算法(NSGA)^[11]等, 但多目标智能优化算法在寻找 Pareto 解的过程中容易陷入局部最优, 难以获得全局最优。

文献[7-18]中含 DG 的主动配电网无功优化均未考虑 DG 出力的不确定性, 求解得到的无功优化结果的全局性和鲁棒性较差。文献[19]将基于全概率公式的概率潮流和化学反应算法相结合, 求解考虑负荷波动和 DG 出力随机性的主动配电网无功优化模型。文献[20]基于(2m+1)点估计法和改进的多目标蜂群算法求解多目标无功优化模型。文献[21]进一步考虑风光出力的相关性, 并采用多目标粒子群算法求解多目标无功优化模型。文献[22]基于随机响应面法建立了主动配电网随机优化模型, 并结合粒子群算法求解该模型。文献[19-22]中的随机无功优化模型均是概率潮流和智能优化算法相结合, 但概率潮流的确定性转换过程复杂, 且改变了确定性无功优化模型, 求解难度大。为此, 文献[23]利用同步回代缩减法进行场景缩减, 提出了基于多场景的配电网无功优化方法, 降低了求解难度。但文献[19-23]都未考虑 DG 的无功调节能力, 以及和离散无功调节装置的协调。

为了解决主动配电网无功优化的调节时序和不确定性问题, 本文提出基于机会约束规划的主动配电网两阶段无功优化方法, 在第一阶段通过优化有载调压变压器、并联电容器等离散控制装置进行无功调节, 在第二阶段保持离散无功调节装置不变, 考虑 DG 的不确定性优化 DG 的无功出力, 通过配电网潮流线性化和二阶锥松弛, 构建了基于 MISOCP 的两阶段机会约束优化模型; 基于子模型优化的场景缩减法^[24], 使得机会约束优化方法的场景数大大减少。仿真算例结果表明了本文所提出的两阶段无功机会约束优化方法的有效性和鲁棒性。

1 主动配电网线性化潮流模型

1.1 Distflow 潮流模型

Distflow 潮流模型是采用支路电流和支路功率等变量来建立辐射状配电网潮流方程, 可用下式描述。

$$P_j^{\text{DG}} - P_j^{\text{L}} = \sum_{j \rightarrow k} P_{jk} - \sum_{i \rightarrow j} (P_{ij} - r_{ij} l_{ij}) + g_j u_j \quad (1)$$

$$Q_j^{\text{DG}} - Q_j^{\text{L}} + u_j b_{c_j} + u_j b_j = \sum_{j \rightarrow k} Q_{jk} - \sum_{i \rightarrow j} (Q_{ij} - x_{ij} l_{ij}) \quad (2)$$

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 = l_{ij} u_i \quad (3)$$

$$\frac{u_j}{t_{ij}} = u_i - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij} \quad (4)$$

式中: P_j^{DG} 、 Q_j^{DG} 分别表示节点 j 处的 DG 有功出力和无功出力; P_j^{L} 、 Q_j^{L} 分别表示节点 j 处的负荷有功需求和无功需求; P_{ij} 、 Q_{ij} 分别表示 ij 支路的有功功率和无功功率; r_{ij} 、 x_{ij} 表示 ij 支路的串联电阻和电抗; l_{ij} 表示 ij 支路的电流幅值平方; t_{ij} 表示 ij 支路为变压器支路的变压器变比, 当 ij 支路不是变压器支路时, t_{ij} 为 1。 $y_j = g_j + b_j$ 表示节点 j 处的并联导纳; b_{c_j} 表示节点 j 处的离散并联电容器电纳; u_i 表示节点 i 的电压幅值平方。

1.2 Distflow 潮流模型的线性松弛方法

式(1)、式(2)和式(4)中除了 $u_j b_{c_j}$ 、 $\frac{u_j}{t_{ij}}$ 两个双线性项外, 其他项均为线性项, 为此, 本文对 $u_j b_{c_j}$ 、 $\frac{u_j}{t_{ij}}$ 两个双线性项进行线性化。以 $u_j b_{c_j}$ 为例, 采用文献[25]中的截断级数法来表示 $u_j b_{c_j}$, 如式(5)所示。

$$u_j b_{c_j} = u_j \underline{b}_{c,j} + \delta_j \sum_{k=0}^{m_j} 2^k z_j^k u_j \quad (5)$$

式中: $b_{c,j}$ 表示节点 j 处的离散并联电容器电纳最小值; δ_j 表示离散并联电容器的投切一组的电纳值; z_j^k 为引入的 0-1 变量, 表示离散并联电容器投切组数。

令 $w_j^k = z_j^k u_j$, 为引入中间变量, 采用 Big-M 方法进行等价转换, 如式(6)所示。

$$\begin{cases} u_j - M(1 - z_j^k) \leq w_j^k \leq u_j + M(1 - z_j^k) \\ -Mz_j^k \leq w_j^k \leq Mz_j^k \end{cases} \quad (6)$$

式中, M 为一个足够大正数。因此, $u_j b_{c,j}$ 就可以线性化为式(5)、式(6)。同理, $\frac{u_j}{t_{ij}^2}$ 也可以采用这个方法线性化。

式(3)可以先松弛为

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 = l_{ij} u_i \Rightarrow P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq l_{ij} u_i \quad (7)$$

然后进行旋转锥约束转化为

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ l_{ij} - u_i \end{array} \right\|_2 \leq l_{ij} + u_i \quad (8)$$

2 配电网无功优化的两阶段机会约束优化

2.1 主动配电网两阶段无功机会约束优化模型

考虑 DG 出力和负荷需求不确定性的采样场景, 主动配电网两阶段无功机会约束优化模型第一阶段优化目标是使得网损期望值最小, 并且要求有载变压器、并联电容器等离散无功调节装置尽可能避免频繁动作, 以减少设备磨损, 为此, 本文采用网损期望值和离散无功设备调节量两者的加权和作为无功优化目标, 如式(9)所示。

$$\min F = C_p \left(\sum_{s=1}^{NS} \pi^s \sum_{(i,j) \in L} r_{ij} l_{ij}^s \right) + C_s \left(\sum_{j \in C_{cap}} T_{c,j} + \sum_{(i,j) \in T_{Trf}} T_{o,ij} \right) \quad (9)$$

本文所有公式中所有字母中上标 s 表示在第 s 个 DG 和负荷出力采样场景下的相应变量。式(9)中: π^s 为场景 s 发生的概率; C_p 、 C_s 为权重系数, 且 $C_p + C_s = 1$; $r_{ij} l_{ij}^s$ 为配电网支路 ij 网损; $T_{c,j}$ 表示节点 j 处并联电容器相对上次调节的上限值; $T_{o,ij}$ 示变压器支路 ij 相对上次调节的上限值; L 、 C_{cap} 、 T_{Trf} 分别表示所有支路集合、并联电容器接入节点集合和变压器支路集合。

配电网无功随机无功优化的约束条件包括潮流约束、有载调压器附加约束、并联电容器附加约束、

节点电压约束、支路电流约束、DG 运行约束等, 依次介绍如下。

1) 线性化潮流约束

主要是采用第 1 节介绍的配电网线性化潮流模型, 考虑 DG 和负荷出力的 NS 个采样场景, 第 s 个场景下的线性化潮流约束描述为

$$P_j^{DG,s} - P_j^{L,s} = \sum_{j \rightarrow k} P_{jk}^s - \sum_{i \rightarrow j} (P_{ij}^s - r_{ij} l_{ij}^s) + g_j u_j^s, \quad (10)$$

$$\forall j \in B, \forall s = 1, \dots, NS$$

$$Q_j^{DG,s} - Q_j^{L,s} + \underbrace{b_{c,j}^{\min} + \delta_j \sum_{k=0}^{n_j} 2^k w_j^{k,s}}_{b_{c,j} u_j^s} + b_j u_j^s =$$

$$\sum_{j \rightarrow k} Q_{jk}^s - \sum_{i \rightarrow j} (Q_{ij}^s - r_{ij} l_{ij}^s) \quad (11)$$

$$\forall j \in B, \forall s = 1, \dots, NS$$

$$\sum_{k=1}^{n_j} \frac{w_{ij}^{k,s}}{(t_{ij}^k)^2} = u_i^s - 2(r_{ij} P_{ij}^s + x_{ij} Q_{ij}^s) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij}^s, \quad (12)$$

$$\forall (i, j) \in T_{Trf}, \forall s = 1, \dots, NS$$

$$u_j^s = u_i^s - 2(r_{ij} P_{ij}^s + x_{ij} Q_{ij}^s) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij}^s \quad (13)$$

$$\forall (i, j) \in L/T_{Trf}, \forall s = 1, \dots, NS$$

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij}^s \\ 2Q_{ij}^s \\ l_{ij}^s - u_i^s \end{array} \right\|_2 \leq l_{ij}^s + u_i^s, \forall (i, j) \in L, \forall s = 1, \dots, NS \quad (14)$$

式(12)表示含有载调压变压器支路的约束; 式(13)表示无有载调压变压器支路的约束, L/T_{Trf} 表示无变压器支路集合。 t_{ij}^k 表示表示变压器支路 ij 的第 k 级变比; $w_{ij}^{k,s} = u_j^s z_{ij}^k$ 为中间变量, z_{ij}^k 为 0-1 变量, 表示变压器支路 ij 是否处于第 k 级变比。

2) 有载调压变压器附加约束

由于采用 1.2 节中的方法对 $\frac{u_j}{t_{ij}^2}$ 进行线性化, 式(12)会附加以下约束条件:

$$-T_{o,ij} \leq \sum_{k=1}^{n_j} z_{ij}^k t_{ij}^k - t_{ij,old} \leq T_{o,ij}, \forall (i, j) \in T_{Trf} \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^{n_j} z_{ij}^k = 1, z_{ij}^k \in \{0,1\}, \forall (i, j) \in T_{Trf}, \forall k = 1, \dots, n_j \quad (16)$$

$$u_j^s - M(1 - z_{ij}^k) \leq w_{ij}^{k,s} \leq u_j^s + M(1 - z_{ij}^k) \quad (17)$$

$$\forall (i, j) \in T_{Trf}, \forall k = 1, \dots, n_j, \forall s = 1, \dots, NS$$

$$-Mz_{ij}^k \leq w_{ij}^{k,s} \leq Mz_{ij}^k, \forall (i, j) \in T_{Trf}, \forall k = 1, \dots, n_j \quad (18)$$

式中: $t_{ij,old}$ 表示前一个优化周期, 变压器支路 ij 的变比; n_j 表示有载调压变压器总共的变比级数。

3) 并联电容器附加约束

同样由于采用 1.2 节中的方法对 $u_j^s b_{c,j}^s$ 进行线性化, 式(11)会附加以下约束条件:

$$-T_{c,j} \leq \underline{b}_{c,j} + \delta_j \sum_{k=0}^{m_j} 2^k z_j^k - \overline{b}_{c,j,old} \leq T_{c,j}, \forall j \in C_{Cap} \quad (19)$$

$$\underline{b}_{c,j} + \delta_j \sum_{k=0}^{m_j} 2^k z_j^k \leq \overline{b}_{c,j}, \forall j \in C_{Cap} \quad (20)$$

$$\begin{cases} u_j^s - M(1 - z_j^k) \leq w_j^{k,s} \leq u_j^s + M(1 - z_j^k) \\ \forall j \in C_{Cap}, \forall k = 1, \dots, m_j, \forall s = 1, \dots, NS \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} -Mz_j^k \leq w_j^{k,s} \leq Mz_j^k \\ \forall j \in C_{Cap}, \forall k = 1, \dots, m_j, \forall s = 1, \dots, NS \end{cases} \quad (22)$$

$$z_j^k \in \{0, 1\}, \forall j \in C_{Cap}, \forall k = 1, \dots, m_j \quad (23)$$

式中: $\overline{b}_{c,j,old}$ 表示前一个优化周期, 并联电容器的电纳; m_j 表示并联电容器总共的投切组数; $w_j^{k,s} = u_j^s z_j^k$ 为中间变量; $\overline{b}_{c,j}$ 、 $\underline{b}_{c,j}$ 分别表示并联电容器的电纳上下限。

4) 节点电压约束

$$\underline{u}_j \leq u_j^s \leq \overline{u}_j, \forall j \in B, \forall s = 1, \dots, NS \quad (24)$$

式中: \overline{u}_j 、 \underline{u}_j 分别表示节点电压幅值平方的上下限; B 为所有节点集合。

5) 支路电流约束

$$l_{ij}^s + P_{ij}^s g_{ij} - Q_{ij}^s b_{ij} + \frac{|y_{ij}|^2 u_i^s}{4} \leq \overline{l}_{ij} \quad (25)$$

$$\forall (i, j) \in L, \forall s = 1, \dots, NS$$

$$l_{ij}^s - (P_{ij}^s - l_{ij}^s r_{ij}) g_{ij} + (Q_{ij}^s - l_{ij}^s x_{ij}) b_{ij} + \frac{|y_{ij}|^2 u_j^s}{4} \leq \overline{l}_{ij} \quad (26)$$

$$\forall (i, j) \in L, \forall s = 1, \dots, NS$$

式中: $y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij}$ 表示 ij 支路的并联导纳; \overline{l}_{ij} 表示支路电流幅值平方的上限。式(25)一式(26)中是采用 π 型等值电路考虑了并联支路, 由于在优化的过程中无法预先得知支路是否存在反向潮流, 式(25)在正常潮流流向情况下成立, 而式(26)在存在反向潮流的情况下成立, 两者互补。

6) DG 运行约束

$$-P_j^{DG,s} \left(\frac{\sqrt{1 - (pf^d)^2}}{pf^d} \right) \leq Q_j^{DG,s} \leq P_j^{DG,s} \left(\frac{\sqrt{1 - (pf^d)^2}}{pf^d} \right) \quad (27)$$

$$\forall j \in DG, \forall s = 1, \dots, NS$$

式中, \underline{pf}^d 为 DG 功率因数 pf^d 的下限, DG 的无

功调节能力受到功率因数的限制。

7) 节点电压和支路电流安全机会约束

$$P\left(\sqrt{\underline{u}_j} \leq V_j \leq \sqrt{\overline{u}_j}\right) \geq 1 - \varepsilon, \forall j \in B \quad (28)$$

$$P\left(|I_{ij}| \leq \overline{I}_{ij}\right) \geq 1 - \varepsilon, \forall (i, j) \in L \quad (29)$$

式(28)表示所有场景中 j 节点电压不越限的概率不低于 $1 - \varepsilon$ 。式(29)表示所有场景中支路 ij 电流不越限的概率不低于 $1 - \varepsilon$ 。

主动配电网两阶段无功机会约束优化方法第一阶段通过控制有载调压变压器和并联电容器等慢动作的无功调节装置, 控制变量为离散无功调节装置动作的整数变量, 不随 DG 的出力不确定性的改变而改变, 也称为“当前变量(here and now)”; 第二阶段通过控制 DG 无功出力快速变化, 随着 DG 的改变而相应调整, 称为“观望变量(wait and see)”。第二阶段的 DG 无功出力调整是根据有功变化按照预先定义的二次决策规则, 即

$$Q_j^{DG,s} = A_j + B_j P_j^{DG,s} + C_j (P_j^{DG,s})^2 \quad (30)$$

式中: A_j 、 B_j 、 C_j 为二次决策规则系数, 可以将式(30)代入式(11)求解上述两阶段无功机会约束优化模型, 便可得到二次决策规则系数。

2.2 基于缩减场景的机会约束优化方法

求解 2.1 节所建立的两阶段无功机会约束优化模型需要抽样 DG 和负荷不确定性输入的所有场景, 巨大的场景数导致优化时间剧增。为此, 本节采用基于缩减场景的机会约束求解方法, 只需求解少量的典型性场景即可。基于场景缩减的机会约束优化求解步骤如图 1 所示。

步骤 1: 初始化, 输入配电网线路参数、DG 出力和负荷预测值, 迭代器置 1。

步骤 2: 求解基点处(DG 出力和负荷预测值)配电网无功优化模型, 式(9)为优化目标, 式(10)一式(27)为约束条件, 这是一个混合整数二阶锥规划模型, 可以在 Matlab 平台上调用 Yalmip+Cplex 12.8 求解 MISOCP 模型。

步骤 3: 根据 DG 出力和负荷预测误差概率分布函数, 根据式(31)产生 N 个预测误差场景, 再加上 DG 出力和负荷预测值得到 N 个输入 DG 出力和负荷值; 在步骤 2 输出基点处无功优化结果的基础上, 通过前推回代求解配电网潮流, 以校验节点电压和支路电流是否越限。

$$2^l \sum_{i=0}^{n-1} \binom{N}{i} \varepsilon^i (1 - \varepsilon)^{N-i} \leq \gamma \quad (31)$$

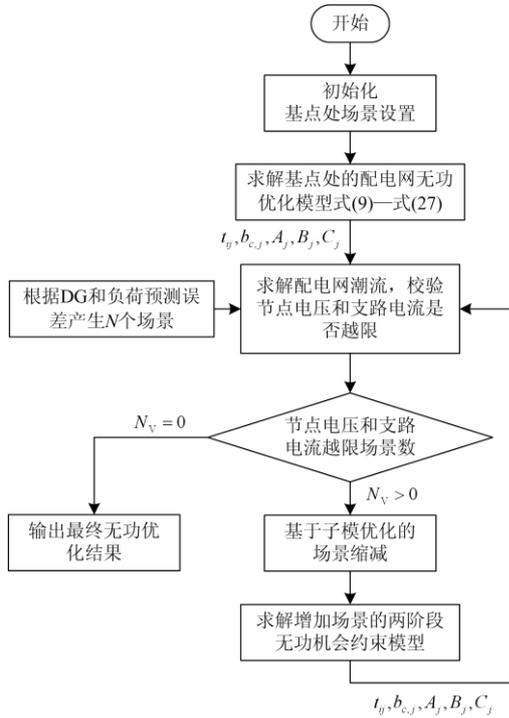


图1 本文所提出的机会约束优化求解步骤

Fig. 1 Procedure of solving chance constrained optimization proposed in this paper

式中： l 为0-1变量； n 为整数变量； γ 为置信参数，即成立的概率不低于 $1-\gamma$ 。式(31)允许可接受的风险水平 ε 和 γ ，通常 γ 小到可以忽略不计的^[26]。因此，建议选用 N 值尽可能大，实际上 N 越大，所需要的求解场景数越多，求解耗时越大。

步骤4：根据步骤3统计的越限场景数 N_v 来判断是否大于0，如果 $N_v = 0$ ，则输出最终无功优化结果；如果 $N_v > 0$ ，则采用基于子模优化的缩减场景法^[24]从越限场景中选择最具典型性的场景。

步骤5：求解新增场景下的两阶段机会约束规划模型，更新无功优化输出结果，返回步骤3。

3 仿真分析

本文采用文献[27]中的95节点系统，其拓扑图如图2所示。33/11 kV有载调压变电站作为供电起点，假设基准电压为11 kV，基准功率为10 MVA。在支路15-62和支路37-38之间分别连接有电压调节器VR₁和VR₂。有载调压变压器和电压调节器的工作范围为0.9~1.1，且均分为33级。两个并联电容器(SSC)分别接入节点58和73。每个并联电容器的可提供多达300 kvar的无功，且均分为15级。两个DG分别接入节点42和95。42节点的DG预测出力为1.1 MW，95节点的DG预测出力为1.2 MW，DG的

功率因数上限为0.95。DG出力和负荷预测误差服从高斯分布，标准差 σ^d 为10%的预测值。95节点系统的线路参数、负荷预测数据见文献[27]。

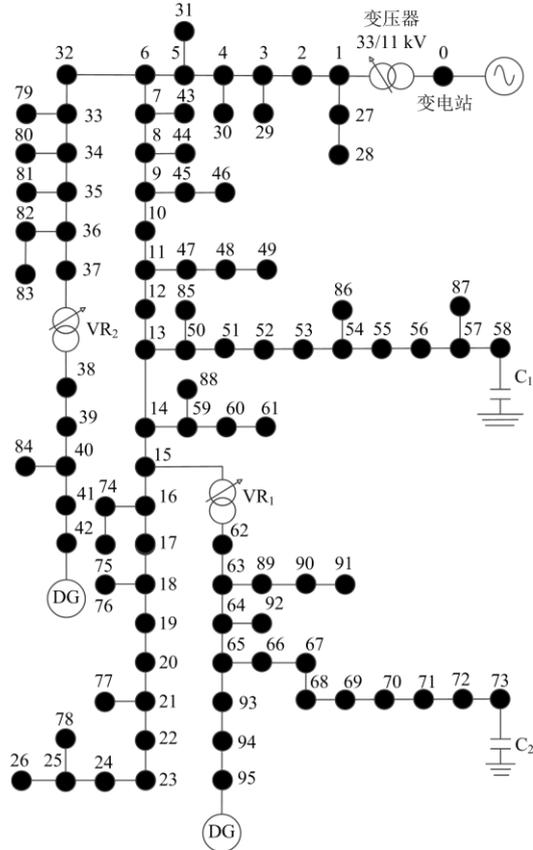


图2 95节点系统拓扑图

Fig. 2 Topology of a 95-bus system

为了准确地估计采样数 N ，式(14)中 ε 设为0.02，置信参数设为 10^{-10} ，得到如表1所示的最小采样数，以保证机会约束成立的概率不低于98%。

表1 95节点系统的最小采样数 N

Table 1 Minimum sampling number N for a 95-bus system

n	l	N
499	107	16 272

当 $C_p=1$ ，表2给出了采用确定性优化和机会约束优化无功优化结果对比，表3给出了采用确定性优化和机会约束优化的DG二次决策系数。从表2中不难看出：无论是采用确定性优化方法还是机会约束优化方法，SSC的调节量没有变化，都是60 kvar，而TR和VRs则呈现出不同的调节量。而从表3中可以看出，采用确定性优化方法的DG无功调节量一个固定值，而采用机会约束优化方法为了应对DG有功出力的变化而灵活调整。

表 2 采用确定性优化和机会约束优化无功优化结果对比

Table 2 Comparison of reactive power optimization results obtained by deterministic optimization and chance constrained optimization

方法	σ^d	SSC-1/ kvar	SSC-2/ kvar	TR	VR ₁	VR ₂
确定性 优化	—	60	60	1.043 75	0.981 25	1.000 0
	0.10	60	60	1.031 25	0.981 25	1.006 25
机会约 束优化	0.15	80	60	1.018 75	0.975 00	1.012 50
	0.20	60	60	1.025 00	0.968 75	1.000 00
	0.25	60	60	1.031 25	0.987 50	0.987 50

表 3 DG 二次决策规则系数

Table 3 Quadratic decision rule coefficients of DG

方法	σ^d	节点 42 处 DG			节点 95 处 DG		
		A_j	B_j	C_j	A_j	B_j	C_j
确定 性优 化	—	0.036 2	0	0	0.009 2	0	0
机会 约束 优化	0.10	-0.020 7	0.783 0	-2.484 7	-0.042 6	0.955 3	-4.260 4
	0.15	-0.003 3	0.453 7	-1.069 2	-0.005 3	0.305 5	-1.284 9
	0.20	-0.001 7	0.417 6	-1.087 4	-0.022 3	0.595 6	-2.477 0
	0.25	-0.001 3	0.478 5	-1.254 3	-0.000 5	0.232 7	-1.248 0

为了进一步比较机会约束优化方法确定性和优化方法, 本文统计了 SFR (至少有一个节点电压越限的场景数百分比)、 VVP (N 次蒙特卡洛仿真中总的节点电压越限数百分比)和 CI (机会约束优化方法相对确定性优化方法增加网损百分比)三个指标, 如表 4 所示。从表 4 中不难看出: 采用确定性优化方法的 SFR 和 VVP 两个指标随着 DG 出力预测误差标准差的增大而恶化, 这是因为随着 DG 出力预测误差标准差, DG 的出力波动范围越大。另外, 从表 4 也可以看出, 采用机会约束优化方法能有效地消除节点电压越限问题, 而采用确定性优化方法至少 40% 的场景至少有一个节点电压越限; 而机会约束优化方法更加鲁棒, 几乎能消除所有节点电压越限, 最高只有 0.25%, 也符合式(14)中设置的先验概率界限。机会约束优化方法解的鲁棒性代价是使得系统网损略微增加。这种网损增加换取电力系统安全性的折中方法是电力系统运行一个重要特征, 即用保守性来换取鲁棒性。

表 5 比较了确定性优化方法和机会约束优化方法的二阶锥松弛的最大误差、优化时间等优化性能。从表 5 中可以看出: 机会约束方法的迭代次数较少, 经过 2~3 次就可以获得最优无功优化结果。但机会约束优化方法的优化时间比确定性优化方法更长,

表 4 95 节点系统节点电压约束越限比较

Table 4 Comparison of voltage constraint violations for a 95-bus system

σ^d	$SFR/\%$		$VVP/\%$		$CI/\%$
	确定性 优化	机会约 束优化	确定性 优化	机会约 束优化	
0.10	42.18	0.67	6.50	0.01	2.29
0.15	48.86	0.28	10.92	0	5.86
0.20	53.22	0.11	14.75	0	6.34
0.25	55.85	5.67	17.91	0.25	3.18

表 5 确定性优化和机会约束优化性能比较

Table 5 Performance comparison between deterministic optimization and chance constrained optimization

方法	σ^d	二阶锥松弛 最大误差	优化 时间/s	迭代 次数	场景 数
确定性 优化	—	3.2×10^{-8}	2.61	—	—
	0.10	2.0×10^{-7}	48.12	2	6
机会约束 优化	0.15	1.7×10^{-8}	97.34	3	11
	0.20	2.1×10^{-8}	109.54	3	13
	0.25	1.3×10^{-7}	102.4	3	12

主要是机会约束优化方法进行了 N 次潮流校验安全性和 2~3 次确定性优化, 耗费了大量时间。最后, 表 5 反映了二阶锥松弛的最大误差小于 10^{-7} , 即二阶锥松弛方法具有很高的计算精度。

最后, 本文分析了 C_s 对无功优化结果的影响, 表 6 给出了不同 C_s 对并联电容器投切次数、有载调压变压器动作次数、网损的影响, 随着 C_s 增加, 并联电容器投切次数、有载调压变压器动作次数逐渐减少, 而网损逐渐增加。

表 6 不同 C_s 下的无功优化结果

Table 6 Reactive power optimization results under different C_s

C_s	并联电容器 投切次数	有载调压变压器 动作次数	正则化的 网损
0	12	12	1
0.25	12	6	1.043
0.5	6	7	1.073
0.75	4	5	1.103
1	2	5	1.121

4 结论

本文考虑了 DG 出力和负荷的不确定性, 提出了主动配电网两阶段无功机会约束优化方法。通过将配电网潮流方程线性化和二阶锥松弛, 构建了基于场景缩减的两阶段无功机会约束优化模型。通过 95 节点系统仿真, 结果表明:

1) 本文所提出的机会约束优化方法不仅能对传统的离散无功控制装置进行优化, 而且能优化 DGs 的无功功率与其实际有功之间的二次决策规则。

2) 与确定性优化方法相比, 本文所提出的机会约束优化方法能有效地消除节点电压越限问题, 而采用确定性优化方法至少 40% 的场景至少有一个节点电压越限。机会约束方法解的鲁棒性代价是使得系统网损略微增加。

3) 随着 C_s 增加, 并联电容器投切次数、有载调压变压器动作次数逐渐减少, 而网损逐渐增加。

参考文献

- [1] 安然, 吴俊勇, 石琛, 等. 基于随机矩阵和历史场景匹配的配电网无功优化[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 69-78.
AN Ran, WU Junyong, SHI Chen, et al. Reactive power optimization of distribution network based on random matrix and historical scenario matching[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 69-78.
- [2] 王艺, 王宾, 刘阳, 等. 计及分布式电源动态行为的配电网重构优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 164-172.
WANG Yi, WANG Bin, LIU Yang, et al. Optimization strategy for distribution network reconfiguration considering the dynamic behavior of DGs[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 164-172.
- [3] 赵楠, 王蓓蓓. 计及多类型需求响应资源的配电网分布式电源优化配置[J]. 中国电力, 2019, 52(11): 51-59, 67.
ZHAO Nan, WANG Beibei. Optimal allocation of distributed generation in distribution system considering multi-type demand response resources[J]. Electric Power, 2019, 52(11): 51-59, 67.
- [4] 肖浩, 裴玮, 董佐民, 等. 基于元模型全局最优化方法的含分布式电源配电网无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20): 1-13.
XIAO Hao, PEI Wei, DONG Zuomin, et al. Reactive power optimization of distribution network with distributed generation using metamodel-based global optimization method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 1-13.
- [5] LI P, ZHANG C, WU Z, et al. Distributed adaptive robust voltage/var control with network partition in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2245-2256.
- [6] 王文宾, 靳伟, 李洪涛, 等. 考虑光伏集群无功贡献的配电网无功电压优化调节方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 114-123.
WANG Wenbin, JIN Wei, LI Hongtao, et al. Reactive voltage optimization regulation method of distribution network considering the reactive power contribution of a photovoltaic cluster[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 114-123.
- [7] JABR R. Robust volt/var control with photovoltaics[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2401-2408.
- [8] 鲁裕婷, 赵天乐, 都洪基, 等. 基于改进粒子群算法的含 DG 配电网无功优化[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 69-74.
LU Yuting, ZHAO Tianle, DU Hongji, et al. Reactive Power optimization of distribution network with distributed generation based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 69-74.
- [9] NIKNAM T, ZARE M, AGHAEI J. Scenario-based multiobjective volt/var control in distribution networks including renewable energy sources[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2004-2019.
- [10] 吴霜, 季聪, 孙国强. 含分布式储能的配电网多目标运行优化策略研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 20-26.
WU Shuang, JI Cong, SUN Guoqiang. Multiple objection operation strategy optimization research of distribution network including distributed energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2): 20-26.
- [11] 张晓英, 张艺, 王琨, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的含分布式电源配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 55-64.
ZHANG Xiaoying, ZHANG Xi, WANG Kun, et al. Reactive power optimization of distribution network with distributed generations based on improved NSGA-II algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 55-64.
- [12] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的三相有源配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 58-64.
LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Reactive power optimization for three-phase distribution networks with distributed generators based on mixed integer second-order cone programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 58-64.
- [13] 林少华, 吴杰康, 莫超, 等. 基于二阶锥规划的含分布式电源配电网动态无功分区与优化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 238-246.
LIN Shaohua, WU Jiekang, MO Chao, et al. Dynamic partition and optimization method for reactive power of distribution networks with distributed generation based on second-order cone programming[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 238-246.

- [14] KRYONIDIS G, DEMOULIAS C, PAPAGIANNIS G. A two-stage solution to the bi-objective optimal voltage regulation problem[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2): 928-937.
- [15] 徐玉琴, 刘杨, 谢庆. 基于全寿命周期成本的配电网无功规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 30-36.
XU Yuqin, LIU Yang, XIE Qing. Research on reactive power planning of distribution network based on life cycle cost[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 30-36.
- [16] 邓长虹, 马庆, 肖永, 等. 基于自学习迁移粒子群算法及高斯罚函数的无功优化方法[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3341-3346.
DENG Changhong, MA Qing, XIAO Yong, et al. Reactive power optimization based on self-learning migration particle swarm optimization and Gaussian penalty function[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3341-3346.
- [17] 符杨, 周晓鸣, 苏向敬. 多电压等级不平衡主动配电网电压无功自适应多目标协调优化[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 126-137.
FU Yang, ZHOU Xiaoming, SU Xiangjing. Adaptive and coordinated volt/var optimization for unbalanced active distribution networks of multiple voltage levels[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2136-2147.
- [18] CHENG S, CHEN M Y. Multi-objective reactive power optimization strategy for distribution system with penetration of distributed generation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 62: 221-228.
- [19] 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.
- [20] ZARE M, NIKNAM T, AZIZIPANAH R, et al. Multi-objective probabilistic reactive power and voltage control with wind site correlations[J]. Energy, 2014, 66: 810-822.
- [21] 刘梦依, 邱晓燕, 张志荣, 等. 计及风光出力相关性的配电网多目标无功优化[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1892-1899.
- LIU Mengyi, QIU Xiaoyan, ZHANG Zhirong, et al. Multi-objective reactive power optimization of distribution network considering output correlation between wind turbines and photovoltaic units[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1892-1899.
- [22] 张世达, 孙永辉, 赵景涛, 等. 基于随机响应面法的主动配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 30-38.
ZHANG Shida, SUN Yonghui, ZHAO Jingtao, et al. Optimal reactive power flow in active distribution network based on stochastic response surface method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 30-38.
- [23] 郑能, 丁晓群, 管志成, 等. 考虑相关性的含风电的配电网无功优化[J]. 南方电网技术, 2018, 12(1): 62-69.
ZHENG Neng, DING Xiaqun, GUAN Zhicheng, et al. Reactive power optimization in distribution network with wind turbine generators considering the correlations[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(1): 62-69.
- [24] WANG Y, LIU Y, KIRSCHEN D. Scenario reduction with submodular optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2479-2480.
- [25] DING T, LIU S, YUAN W, et al. A two-stage robust reactive power optimization considering uncertain wind power integration in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 7(1): 301-311.
- [26] MOHAJERIN, ESFAHANI, PEYMAN, et al. Performance bounds for the scenario approach and an extension to a class of non-convex programs[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(1): 46-58.
- [27] AGALGAONKAR Y, PAL B, JABR R. Distribution voltage control considering the impact of PV generation on tap changers and autonomous regulators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 182-192.

收稿日期: 2021-01-19; 修回日期: 2021-02-25

作者简介:

卢姬(1990—), 女, 硕士研究生, 工程师, 从事综合能源服务策略研究工作; E-mail: 980749437@qq.com

常俊晓(1992—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为电网运行与控制、新能源并网。

(编辑 姜新丽)