

基于概率多场景的柔性配电网鲁棒运行优化

王志强¹, 方正¹, 刘文霞¹, 王凌飞¹, 王朝亮², 许 烽²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要:分布式电源和波动负荷的接入使得传统配电网的调节设备和手段凸显出局限性, 柔性开关设备(SOP)的应用可以解决间歇性源荷带来的问题。针对多端柔性互联设备在柔性配电网中的应用, 建立计及运行损耗的三端 SOP 的拓扑结构和数学模型; 考虑到源荷出力的不确定性会导致配电网节点电压越限和功率潮流不合理, 将鲁棒优化和场景分析方法相结合, 建立基于概率多场景的鲁棒运行优化模型, 并采用锥优化方法进行求解; 为了实现场景数量和精度平衡下多场景的快速生成, 提出基于拉丁超立方抽样的概率多场景生成方法。以 3 组 IEEE 33 节点系统组成的配电网为算例, 验证了所提鲁棒运行优化模型和场景生成方法的有效性, 所提模型与方法实现了配电网运行经济性与安全性的协调, 显著提高了模型计算效率, 有效避免了“维数灾”现象。

关键词:柔性配电网; 三端 SOP; 概率多场景; 鲁棒运行优化; 拉丁超立方抽样

中图分类号: TM 761

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.006

0 引言

随着国家新能源和电改政策的逐步推进, 大量的分布式电源 DG (Distributed Generation)、电动汽车充电装置、储能装置以及微网接入配电网, 且渗透率不断提高^[1-2]。新型能源和负荷的随机性容易引起馈线功率大幅波动以及电压越限^[3], 使配电网的运行面临严峻挑战。然而, 受制于配电网规模、地域分散性带来的控制系统快速性不足, 多主体导致的新型源荷可观、可控性限制, 以及电网企业投资能力下降等因素, 配电网很难实现全局运行的实时优化。同时, 基于联络开关(TS)的网络重构则受到开关响应速度、动作寿命和冲击电流等问题的限制^[4], 不能满足未来配电网的发展要求, 利用柔性电力电子技术改造配电网是一个重要趋势, 能有效解决传统配电网发展中的一些瓶颈问题。

柔性开关设备 SOP (Soft Open Point) 是一种新型电力电子器件, 安装于传统联络开关处, 通过准确控制向馈线传输的有功和无功功率来改善电压水平以及提高分布式电源消纳能力^[5]。SOP 的引入改变了传统配电网闭环设计、开环运行的供电方式, 极大提高了配电网控制的实时性与快速性, 同时给配电网的运行带来了诸多益处。文献[5]将 SOP 应用于配电网的联络开关处, 并与储能相结合, 解决了光伏功率波动的问题, 提高了配电网分布式电源渗透率;

文献[6]将多个 SOP 配置在馈线的多条分支线之间, 通过网络重构与 SOP 的协同优化, 实现配电网短时间尺度上的运行控制, 改善了电压质量并提升了分布式电源的消纳能力。以上文献 SOP 在配电网中的应用均为双端结构, 与双端 SOP 相比, 多端 SOP 可以使馈线之间的功率交换更加灵活, 若多馈线来自不同变电站可实现均衡站间负载、提高资产利用率、降低变电站全停小概率事件下电网安全风险的作用。

国家科技部相继设立了“863”和重点研发项目开展该方向课题的研究, 并取得了初步成果。目前, 基于 SOP 的配电网运行优化模型主要有 2 类。一类是以系统网损最小为目标, 以节点运行电压水平为约束条件, 以 SOP 端口输出功率为控制变量, 从静态和动态潮流优化的角度验证了 SOP 的优势和潜在效益^[7], 同时, 文献[7]中指出 SOP 的控制需要配电网数据采集与监控系统的支持, 以数据采集、传输、优化计算和控制为一个控制周期, 在控制周期内如果分布式电源和负荷随机波动, 也存在电压越限的可能性。另一类如文献[8], 当电压未突破上下限阈值时, 以系统网损最小为目标, 以电压合格为约束, 突破阈值后, 以电压偏差和网损归一化后的线性叠加值最小为目标。该方法在一定程度上改善了电压越限情况, 然而监测时间点电压越过阈值与下一控制周期内新能源并网引起的电压波动并未呈现明显的相关性, 因此, 没有从根本上解决电压越限风险问题, 且随着分布式电源渗透率的增加, 天气影响下的越限风险会大幅增加。解决该问题有 2 类方法: 一类是通过缩短配电网的调控周期, 缩小短期波动范围, 但这需要配电网在信息和通信系统中有较大投入, 并且现有的技术条件有一定限制; 另一类是考

收稿日期: 2018-10-08; **修回日期:** 2019-04-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFB0903100); 国家电网公司科技项目 (521104170043)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2017YFB0903100) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (521104170043)

考虑源荷的随机性,采用鲁棒优化控制方法,通过牺牲部分网损性能换得电压约束的满足^[9]。为了在保证电压安全的条件下尽可能提高经济性,可以将鲁棒优化和随机规划方法相结合,采用场景分析方法,在满足鲁棒约束的条件下,以多场景下的期望值最优为目标,提高优化方案的经济性。实现多场景鲁棒优化的关键是场景数量和精度平衡下的快速多场景生成技术,文献[9]在鲁棒电压优化模型中,将随机变量的概率分布函数离散化,再基于场景树的抽样方法生成多场景,该方法会随着随机变量数量的增加呈现“维数灾”现象,最终导致优化效率严重下降。

综上所述,本文以大量分布式电源和波动负荷并网为背景,以三端 SOP 与 3 条馈线组成的配电系统为对象,开展优化运行研究,主要创新思路有 3 点:①三端 SOP 整体采用混合式模块化拓扑结构,可以适用于不同工况,数学模型考虑端口内部的拓扑结构对端口损耗系数的影响;②将鲁棒优化和场景分析方法相结合,以系统网损和 SOP 损耗的期望值最小为目标,建立基于概率多场景的鲁棒运行优化模型,实现配电网运行经济性与安全性的协调;③考虑到配电网信息采集、处理、传输和优化全过程的时间限制,以及拉丁超立方抽样能够以较少的抽样次数重建概率分布的特点,提出拉丁超立方抽样、Cholesky 分解和同步回代削减相结合的方法实现概率多场景的快速生成,进一步提高鲁棒运行优化效率,为柔性开关在配电网中的实际应用提供理论和技术参考。

1 三端 SOP 的拓扑结构和数学模型

三端 SOP 位于传统联络开关处,它由全控型电力电子器件组成,需要直流大电容来隔离故障端口,提供直流电压支撑,以及保证直流功率传输平衡,且可以控制 3 条馈线网络间的有功潮流并提供无功功率。三端 SOP 的拓扑结构是以背靠背电压源型变流器(B2B VSC)^[5]为基础,在直流大电容或直流电源侧再并联 1 个电压源型变流器(VSC)。此外,考虑到实际工程中大多采用模块化结构,将 VSC 模块化,对相同端口的子模块进行集中控制,形成模块化多电平换流器 MMC(Modular Multilevel Converter),本文设计如图 1 所示的 MMC 端口的拓扑结构。

三端 SOP 整体采用混合式模块化拓扑结构,包含 2 个半桥式 MMC 端口和 1 个全桥式 MMC 端口。全桥结构在故障情况下有着更好的适应性,直流电压的利用率更高;半桥结构的驱动电路简单,抗不平衡能力强,子模块数量更少,成本更低,损耗更小。该混合式模块化拓扑结构适用于不同工况,可以使馈线之间的功率交换更加灵活,配置成本更少,对线路故障的适应能力更强。

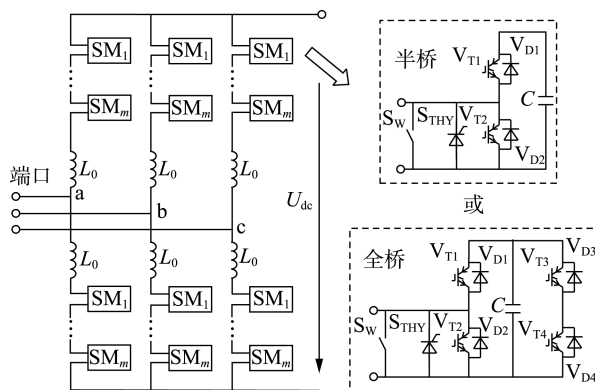


图 1 MMC 及其子模块拓扑结构

Fig.1 Topological structure of MMC and its submodules

VSC 常用的控制模式有功率控制模式(PQ)、定交流电压/频率控制模式(Vf)、定直流电压/无功功率模式(VdcQ)和静止同步补偿器(STATCOM)模式^[10]。在正常运行模式下,通常选取 PQ-VdcQ 控制作为 SOP 的控制模式。当分布式电源的渗透率较大、线路负载分配不均衡时,SOP 为了平衡负载和优化潮流,会在所连馈线之间传输大量的有功功率,应考虑其功率损耗,因此,本文在 SOP 模型和运行优化模型中考虑一定的损耗系数,并且考虑端口内部的拓扑结构对端口损耗系数的影响。

SOP 正常运行时,3 个 MMC 端口共同为配电系统传输有功功率,系统 1 端采用 VdcQ 模式,另外 2 端则采取 PQ 模式,此时,三端 SOP 的可控变量包括 5 个:MMC₁ 有功功率输出 P₁ 和 MMC₂ 有功功率输出 P₂,3 个变流器各自输出的无功功率 Q₁、Q₂ 和 Q₃。设 P_{Mi} 为端口 i 的有功功率损耗,当 MMC₁ 为整流器、MMC₂ 和 MMC₃ 为逆变器时,功率平衡为 P₁ = P₂ + P₃ + ∑ P_{Mi},当 MMC₁ 端和 MMC₂ 端为整流器、MMC₃ 端为逆变器时,功率平衡为 P₁ + P₂ + ∑ P_{Mi} = P₃,各个端口都能向所连馈线提供一定的电压无功支持,因直流电容的隔离而互不影响,仅需满足各自的容量约束即可。

定义三端 SOP 向馈线注入功率为正,各个端口的输出功率满足“圆形”约束,包括有功功率约束和容量约束。

(1) 有功功率约束:

$$P_{k1}(t) + P_{k2}(t) + P_{k3}(t) + \sum_{i=1}^3 P_{kMi}(t) = 0 \quad k \in \Omega_{\text{SOP}} \quad (1)$$

$$P_{kMi}(t) = m_{ki} |P_{ki}(t)| \quad k \in \Omega_{\text{SOP}} \quad (2)$$

(2) 容量约束:

$$\begin{cases} \sqrt{P_{k1}^2(t) + Q_{k1}^2(t)} \leq S_{k1\max} \\ \sqrt{P_{k2}^2(t) + Q_{k2}^2(t)} \leq S_{k2\max} \\ \sqrt{P_{k3}^2(t) + Q_{k3}^2(t)} \leq S_{k3\max} \end{cases} \quad k \in \Omega_{\text{SOP}} \quad (3)$$

其中, Ω_{SOP} 为 SOP 的集合; $P_{k1}(t)$ 、 $P_{k2}(t)$ 、 $P_{k3}(t)$ 和 $Q_{k1}(t)$ 、 $Q_{k2}(t)$ 、 $Q_{k3}(t)$ 分别为 t 时段 SOP 各端口输出的有功功率和无功功率; $P_{kMi}(t)$ 为端口 i 的有功功率损耗; m_{ki} 为端口 i 的有功功率损耗系数; $S_{k1\max}$ 、 $S_{k2\max}$ 和 $S_{k3\max}$ 为 SOP 各端口变压器的接入容量。

2 基于拉丁超立方抽样的概率多场景生成方法

实现多场景鲁棒优化的关键是场景数量和精度平衡下的快速多场景生成技术。考虑到配电网全局优化的时效性以及信息处理和通信系统的技术限制,各负荷和分布式电源出力预测值的取值周期为 15 min^[7]。为提高优化效率,将拉丁超立方抽样方法运用于多场景下鲁棒运行优化模型的场景生成,可以提高抽样精度和场景生成效率。

2.1 随机变量的概率分布生成

根据短期时间段内负荷和能源出力的历史数据,通过概率估计、拟合和检验的方法可以求出随机变量的概率分布。随机变量的概率分布生成越接近于实际运行时的分布情况,则多场景下鲁棒运行优化模型的解就越合理,才能体现出模型的鲁棒性和经济性。

采用核密度估计方法^[11]分析负荷和能源出力的历史数据,具体步骤见附录 A,文献[11-12]采用该方法验证了负荷和分布式电源出力的误差概率分布均服从正态分布。

2.2 基于随机变量概率分布的拉丁超立方抽样

拉丁超立方抽样的本质是基于逆函数转换的分层抽样,不同于场景树抽样的概率分布离散化处理,在不改变原始密度函数的前提下,将分布函数的取值范围分成 N 个互不重叠的等间隔子区间,将子区间中的抽样值基于概率密度函数进行反函数变换,所得抽样结果既满足概率分布特征又能覆盖整个分布区间,抽样效率高。

抽样过程如图 2 所示,步骤如下。

(1) 假设共有 M 个随机变量,每个变量需要抽样的样本个数为 N ,形成 $M \times N$ 阶的样本矩阵 $\mathbf{X}_{MN}$:

$$\mathbf{X}_{MN} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \cdots & x_1^N \\ x_2^1 & x_2^2 & \cdots & x_2^N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_M^1 & x_M^2 & \cdots & x_M^N \end{bmatrix} \quad (4)$$

(2) $F(X)$ 为 X 的概率密度函数,为正态分布函数,为了方便取反函数,将 $F(X)$ 从中间值部分取半,然后分别对左半部分和右半部分进行抽样。

(3) 假设第 M 个随机变量的抽样结果集合为 $\mathbf{X}_M = \{x_M^1, x_M^2, \dots, x_M^k, \dots, x_M^N\}$,正态分布函数的值域区间为 $[0, R]$,根据所需样本数量 N 将该区间等分成 N 个不重叠的子区间,每个区间按均匀分布随机

抽样得到的第 k 个抽样结果 y_M^k 为:

$$y_M^k = Rk/N - U(0, 1) \quad (5)$$

其中, $U(0, 1)$ 为在区间 $(0, 1)$ 均匀分布下的随机取样值。

(4) 取概率分布函数的反函数,得到 x_M^k 的实际采样值为:

$$x_M^k = F^{-1}(y_M^k) \quad (6)$$

(5) 从剩余的子区间中继续抽样,重复上述步骤,直到抽样结束为止。

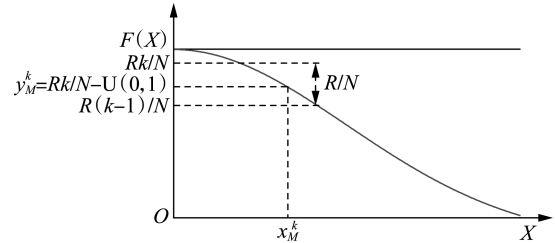


图2 拉丁超立方抽样过程

Fig.2 Latin hypercube sampling process

2.3 基于 Cholesky 分解的场景重新排序

场景生成的准确度不仅与采样值有关,还与每个随机变量采样值之间的相关性有关,一般而言,较小的相关性将带来较高的准确度,Cholesky 分解的目的就是降低场景之间的相关性。根据不同场景之间的相关系数矩阵,构造近似正交的排列矩阵 $\mathbf{L}_{KN}$,对采样矩阵 $\mathbf{X}_{KN}$ 中元素的位置进行重新排序来降低其相关性,且每个元素的大小不变。

Cholesky 分解的步骤如下。

(1) 随机生成一个 $K \times N$ 阶的矩阵 $\mathbf{L}_{KN}$,矩阵 $\mathbf{L}_{KN}$ 中第 k 个行向量由整数 1、2、 $\dots$ 、 N 随机排列而成,其元素值表示矩阵 $\mathbf{X}_{KN}$ 中第 k 个行向量应该排列的位置。

(2) 计算矩阵 $\mathbf{L}_{KN}$ 各行之间的相关系数矩阵 $\boldsymbol{\rho}_L$, $\boldsymbol{\rho}_L$ 是正定对称矩阵,可分解成非奇异下三角矩阵 $\mathbf{D}$ 。

$$\rho_{i,j} = \frac{\text{cov}(\mathbf{L}_{iN}, \mathbf{L}_{jN})}{\sqrt{\text{cov}(\mathbf{L}_{iN}, \mathbf{L}_{iN}) \text{cov}(\mathbf{L}_{jN}, \mathbf{L}_{jN})}} \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\rho}_L = \mathbf{D}\mathbf{D}^T \quad (8)$$

其中, $\text{cov}()$ 表示协方差函数; $\mathbf{L}_{iN}$ 、 $\mathbf{L}_{jN}$ 分别为 $\mathbf{L}_{KN}$ 的第 i 、 j 行。

(3) 计算 $K \times N$ 阶矩阵 $\mathbf{G}_{KN}$:

$$\mathbf{G}_{KN} = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{L}_{KN} \quad (9)$$

(4) 矩阵 $\mathbf{L}_{KN}$ 中的每行元素根据矩阵 $\mathbf{G}_{KN}$ 中相应位置的元素大小进行排序,构造近似正交的排列矩阵。

(5) 矩阵 $\mathbf{X}_{KN}$ 中的每行元素按照更新后的排列矩阵 $\mathbf{L}_{KN}$ 中相应的元素所指示的位置重新排序。

由于矩阵 $\mathbf{G}_{KN}$ 的各行之间不相关,因而矩阵 $\mathbf{L}_{KN}$ 和 $\mathbf{X}_{KN}$ 的每行元素按照矩阵 $\mathbf{G}_{KN}$ 的对应行重新排序

后,各行之间的相关性就被削弱了。

2.4 基于同步回代削减的场景约简

为了满足拉丁超立方抽样的精度要求,生成的场景总数应足够大,样本总体才能更加接近随机变量的概率密度分布情况,然而,如果将所有生成的场景用于鲁棒运行优化模型,将导致优化效率低下,不利于模型的实际应用。

同步回代削减就是通过迭代削减的方式,削减“范数距离”最近的场景,直到场景的数量合适为止,削减后的样本总体仍满足概率分布,其已在文献[9]中应用,具体步骤见附录 B。

3 含三端 SOP 的配电网鲁棒运行优化模型及求解算法

当含 SOP 的配电网接入大量的分布式电源和波动负荷时,波动性和随机性不仅会导致节点电压越限,而且会导致配电网功率潮流不合理和功率分配不可控等现象的发生^[13],为了满足随机变量最劣情况下的节点电压约束,本文采用鲁棒优化和场景分析方法相结合的方法,以多场景下系统网损和 SOP 损耗的期望值最小为目标,牺牲一定的运行经济性,实现电压安全性与配电网经济性的最佳平衡。

3.1 配电网鲁棒运行优化模型

3.1.1 目标函数

含三端 SOP 的配电网鲁棒运行优化模型是通过采集负荷和分布式电源出力数据,结合历史时间段内的波动情况形成概率多场景,再调度三端 SOP 的功率输出,实现多场景下系统期望网损最小。优化目标可描述为:

$$f^{\text{all}} = \min \left\{ \sum_{s=1}^{N_r} p_s [f_s(T) + f_M(T)] \right\} \quad (10)$$

其中, T 为 SOP 的 3 个端口的有功、无功输出的集合, $T = \{P_{k1}, P_{k2}, P_{k3}, Q_{k1}, Q_{k2}, Q_{k3}\}$, 即优化模型中的控制变量; $f_s = \sum P_i$ 为系统有功网损函数; $f_M = \sum P_{kMi}$ 为 SOP 有功功率损耗函数; p_s 为场景 s 的概率; N_r 为削减后的场景数; f^{all} 为所有场景目标函数期望值。

3.1.2 约束条件

约束条件指的是各场景下的运行约束,若配电网在各场景下都能满足运行约束,则配电网处于安全运行状态。运行约束包括三端 SOP 数学模型自身的“圆形”约束和配电网系统中的潮流约束。

(1) 系统的功率平衡约束。

$$P_i^L - P_i^{\text{SOP}} - P_i^{\text{DG}} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (11)$$

$$Q_i^L - Q_i^{\text{SOP}} - Q_i^{\text{DG}} + U_i \sum_{j=1}^n U_j (B_{ij} \cos \delta_{ij} - G_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (12)$$

其中, P_i^L 、 Q_i^L 分别为节点 i 的有功负荷和无功负荷;

P_i^{SOP} 、 Q_i^{SOP} 、 P_i^{DG} 、 Q_i^{DG} 分别为 SOP 和分布式电源在节点 i 注入的有功功率和无功功率; U_i 和 U_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为支路 $i-j$ 的电导和电纳; δ_{ij} 为节点 i 和节点 j 的电压相角之差; n 为节点总数。

(2) 支路容量约束。

$$0 \leq I_{ij}^2 \leq (I_{ij}^{\text{max}})^2 \quad (13)$$

$$I_{ij}^2 = (G_{ij}^2 + B_{ij}^2) (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \delta_{ij}) \quad (14)$$

其中, I_{ij} 为流过支路 $i-j$ 的电流; I_{ij}^{max} 为流过支路 $i-j$ 的最大电流。

(3) 节点电压约束。

$$U_i^{\text{min}} \leq U_i \leq U_i^{\text{max}} \quad (15)$$

其中, U_i^{min} 、 U_i^{max} 分别为节点 i 允许的最小和最大电压。

3.2 模型求解

含三端 SOP 的配电网鲁棒运行优化模型为大规模非线性优化问题。启发式智能算法在求解大规模优化问题时效率低下,容易出现过早收敛的情况,形成局部最优解;二阶锥优化算法是线性空间中凸优化的延伸^[14],具有求解速度快、寻优能力强的特点,广泛应用于求解大规模非线性优化问题^[15]。前述模型中的系统功率平衡约束和支路容量约束为非线性约束, SOP 容量约束是二阶锥约束,可以直接转换成标准二阶锥形式,因此在应用锥优化方法进行求解时,需要通过变量替换或凸松弛的方式将所有非线性约束转化为线性约束、标准二阶锥约束或旋转二阶锥约束^[16]。算法流程图见附录 C 中图 C1,线性化过程如下。

通过变量替换实现非线性约束的线性化,引入变量 X_i 、 Y_{ij} 、 Z_{ij} 将模型中的 U_i 、 U_j 、 δ_{ij} 进行变量替换,如式(16)所示。

$$\begin{cases} X_i = U_i^2 / \sqrt{2} \\ Y_{ij} = U_i U_j \cos \delta_{ij} \\ Z_{ij} = U_i U_j \sin \delta_{ij} \end{cases} \quad (16)$$

引入的替换变量经过凸松弛后满足式(17),是一个旋转二阶锥约束,使得优化模型仍在尖凸锥的约束范围内。该约束在模型中是自然成立的,因此不会造成原问题解的变化。

$$2X_i X_j \geq Y_{ij}^2 + Z_{ij}^2 \quad (17)$$

因此,式(11)、(12)和(14)可以转化为如下线性约束的形式:

$$\begin{cases} P_i^L - P_i^{\text{SOP}} - P_i^{\text{DG}} = \sqrt{2} G_{ii} X_i + \sum_{j=1}^n (G_{ij} Y_{ij} + B_{ij} Z_{ij}) \\ Q_i^L - Q_i^{\text{SOP}} - Q_i^{\text{DG}} = -\sqrt{2} B_{ii} X_i - \sum_{j=1}^n (B_{ij} Y_{ij} - G_{ij} Z_{ij}) \\ I_{ij}^2 = (G_{ij}^2 + B_{ij}^2) (\sqrt{2} X_i + \sqrt{2} X_j - 2Y_{ij}) \end{cases} \quad (18)$$

其中, G_{ii} 、 B_{ii} 分别为节点 i 的自电导和自电纳。

4 算例分析

4.1 算例参数

算例系统由 3 组 IEEE 33 节点系统^[17]组成,其电源端为平衡节点,电力电量保持平衡,3 条馈线末端通过三端 SOP 连接实现区域间互连。其中第二组为改进的 IEEE 33 节点系统,选择若干波动负荷节点,并接入大量分布式电源,节点 4、9、14 所接分布式电源出力均为 0.3 MW,节点 7、13、15、16、29 所接分布式电源出力均为 0.4 MW,节点 20、25、31 所接分布式电源出力分别为 0.8 MW、0.5 MW 和 0.6 MW,分布式电源的渗透率达到 43.07%,系统结构如图 3 所示。节点 7、13 接入大功率风机,其出力波动范围设为 $\pm 20\%$,其余分布式电源的出力波动范围设为 $\pm 15\%$,负荷的波动范围设为 $\pm 10\%$,误差概率分布服从正态分布,这些由分布式电源和波动负荷组成的集合统称为随机变量。

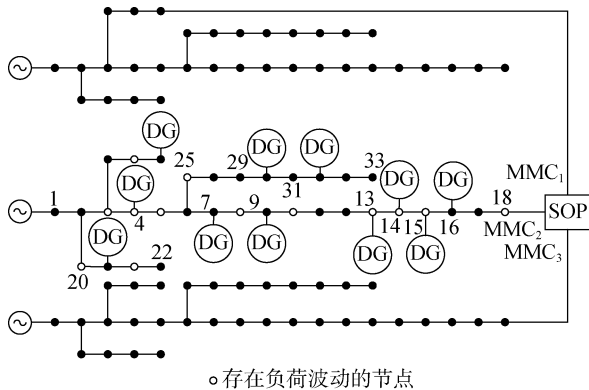


图 3 算例系统结构图

Fig.3 Structure of example system

IEEE 33 节点系统的基准电压为 12.66 kV,基准功率为 100 MV·A,为了方便描述电压越限问题,假定所有节点的电压安全范围为 0.97~1.03 p.u.。考虑到第二组改进的 IEEE 33 节点系统含有大量的分布式电源,对端口容量的需求更大,因此设置三端 SOP 的变流器容量大小分别为 1 MV·A、2 MV·A 和 1 MV·A,MMC₁ 和 MMC₂ 采用半桥结构,MMC₃ 采用全桥结构,半桥结构的损耗系数为 0.015,全桥结构的损耗系数为 0.02^[18]。基于拉丁超立方抽样的场景生成数量设为 1 000 个,约简后的场景数量设为 50 个,与基于场景树抽样的场景生成方法的精度相近。测试系统的硬件环境为英特尔四核 i7-3632QM CPU 2.20 GHz,8 GB 内存,操作系统为 WIN10 64 bit,开发环境为 MATLAB R2012b。

4.2 仿真结果分析

首先进行概率多场景的生成,其核心是拉丁超立方抽样,对节点 21 的负荷数据进行抽样,抽样的场景数量为 1 000 个,利用直方图统计抽样数据,再

采用 MATLAB cftool 工具箱对抽样数据进行误差概率分布拟合,结果如图 4 所示。将拟合结果与原概率分布进行比较,说明了拉丁超立方抽样在概率多场景生成方面具有良好的精度和可靠性,抽样结果覆盖整个分布区间。

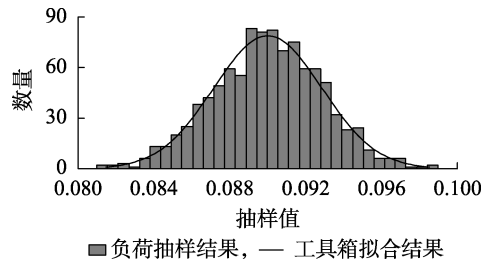


图 4 节点 21 的负荷抽样结果

Fig.4 Load sampling results at node 21

然后对抽样的场景进行重新排序并约简到 50 个,将约简后的场景参数代入模型中,再进行锥模型转换,形成锥优化模型,在 MATLAB 环境下通过 YALMIP^[19] 编程并采用 CPLEX 算法包进行求解,仿真 50 余次,均成功达到收敛,收敛过程以目标函数值的收敛曲线表示,选取典型收敛曲线如图 5 所示。

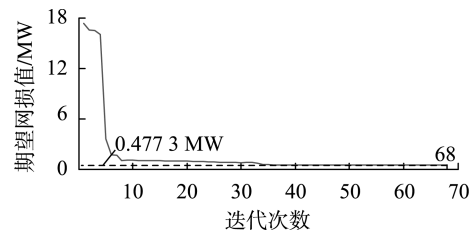


图 5 典型收敛曲线

Fig.5 Typical convergence curve

结果显示,当迭代次数达到 36 次时,目标函数值已经接近模型的最优解,最终迭代到 68 次时终止,优化结果如表 1 所示,系统网损为 0.478 2 MW,将模型的解代入正常场景(无负荷和分布式电源出力波动)和极限场景(负荷最低,分布式电源出力最高)下的潮流计算中,得出节点电压分布曲线如图 6 所示(图中电压为标幺值,后同),均未出现节点电压越限的情况。

为了验证鲁棒优化的效果,在负荷和分布式电源出力相同条件下,与确定性运行优化模型^[9]进行对比。确定性模型的解如表 2 所示,其系统网损为 0.446 3 MW,同样将模型的解代入各场景的潮流计算中,得出节点电压分布曲线如图 7 所示,在正常场景下,未出现节点电压越限的情况,但在极限场景

表 1 鲁棒运行优化模型的解

Table 1 Solution of robust operation optimization model

SOP 端口	有功功率/MW	无功功率/Mvar
MMC ₁	-0.028 7	-0.054 4
MMC ₂	-0.207 6	-0.084 5
MMC ₃	0.236 3	0.347 5

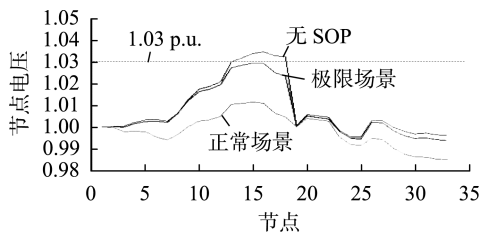


图 6 鲁棒运行优化模型节点电压分布

Fig.6 Node voltage distribution of robust operation optimization model

表 2 确定性运行优化模型的解

Table 2 Solution of deterministic operation optimization model

SOP 端口	有功功率/MW	无功功率/Mvar
MMC ₁	-0.005 4	-0.009 1
MMC ₂	-0.647 3	-0.521 3
MMC ₃	0.652 7	0.627 9

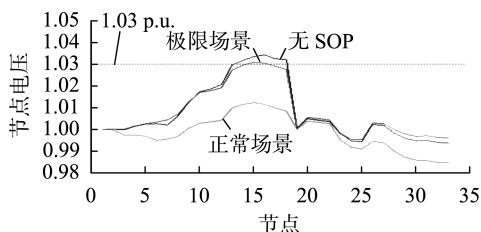


图 7 确定性运行优化模型节点电压分布

Fig.7 Node voltage distribution of deterministic operation optimization model

下,节点 15 和 16 电压越上限。

由上述对比可见,三端 SOP 可以通过控制 3 条网络馈线之间的有功潮流并提供无功功率来提高节点电压的安全性;在网损经济性方面,基于概率多场景的鲁棒运行优化模型稍差于确定性模型,但保证了节点电压的安全性。

4.3 三端 SOP 的适应性和优势

当 SOP 的某端口发生故障,故障端停止与正常端进行功率交换,必然会影响配电网节点电压分布和系统网损。为了验证三端 SOP 在故障情况下的适应性以及相对于双端 SOP 的优势,在算例系统保持不变的情况下,假设图 1 中三端 SOP 的 MMC₁ 端因故障退出运行,形成双端 SOP 结构,仍采用本文提出的鲁棒运行优化方法在极限场景下求出模型的解,如表 3 所示。此时,系统网损为 0.482 3 MW,节点电压分布曲线如图 8 所示。

结果显示,三端 SOP 的某端口发生故障,形成双端结构,在极限场景下仍能保证系统中节点电压不越限,且节点电压分布曲线与原曲线几乎重叠,这

表 3 双端 SOP 结构下模型的解

Table 3 Solution of model with two-terminal SOP structure

SOP 端口	有功功率/MW	无功功率/Mvar
MMC ₁	-0.022 1	-0.050 4
MMC ₂	0.022 1	-0.341 1
MMC ₃	0	0

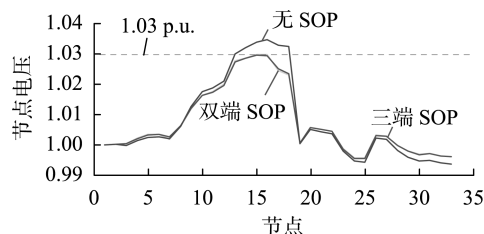


图 8 不同端口结构下节点电压分布

Fig.8 Node voltage distribution of different terminal structures

说明三端 SOP 的故障适应能力强。相比于双端结构,三端结构下的系统网损明显较小,说明三端 SOP 可以使馈线之间的功率交换更加灵活,网损经济性更好。

4.4 鲁棒运行优化模型效果的概率统计分析

为了进一步分析基于概率多场景的鲁棒运行优化模型在不同运行场景下的总体效果,与确定性运行优化模型和传统鲁棒运行优化模型进行比较^[9],以多场景下系统网损期望值为指标,采用蒙特卡洛方法进行验证。在负荷和分布式电源出力等系统参数不变的情况下,先依据随机变量的正态分布函数随机抽取 2 000 个样本场景,然后将各个优化模型的解代入样本场景中进行潮流计算,最后统计电压越限情况并计算系统网损期望值,如表 4 所示。

表 4 各模型电压越限场景数、比例和网损期望值

Table 4 Voltage limit violation number and proportion and expected network loss value of each model

模型	电压越限 场景数	电压越限 场景比例/%	网损期 望值/MW
确定性运行优化模型	364	18.2	0.447 1
传统鲁棒运行优化模型	0	0	0.488 5
本文模型	0	0	0.478 2

由表 4 可见,确定性运行优化模型使得 18.2% 的场景出现越限情况,而本文模型在不同场景下均未出现节点电压越限的情况,表现出良好的鲁棒性;本文模型的系统网损期望值为 0.478 2 MW,位于 0.447 1 MW 和 0.488 5 MW 之间,优于传统鲁棒运行优化模型,很好地实现了配电网经济性和安全性的平衡。

4.5 场景生成方法对模型求解效率的贡献

为了验证基于拉丁超立方抽样的场景生成方法相比于基于场景树抽样的场景生成方法在提高模型计算效率方面的优越性,与文献[9]对比模型求解时间。为控制单一变量,需保证抽样精度相近,在文献[9]场景树抽样中,每个随机变量对应 5 种抽样状态,此时,抽样精度为 8% 左右(抽样值与实际拟合值的误差精度),本文提出的拉丁超立方抽样方法的抽样精度与每个随机变量的样本数 N 有关,调节样本数 N 使得抽样精度为 8% 左右,记录样本数 N 为 1 000,该样本数即为初始场景数量。改变随机变量

数,记录初始场景数量和模型求解时间,结果如表5所示。

表5 模型求解时间对比

Table 5 Comparison of model solving time

方法	随机变量数	初始场景数量	求解时间/s
拉丁超立方 抽样	1	1 000	5.24
	2	1 000	6.33
	3	1 000	7.34
	4	1 000	7.78
	5	1 000	8.22
	6	1 000	8.64
场景树抽样	1	5	0.28
	2	25	1.37
	3	125	2.64
	4	625	3.76
	5	3 125	8.39
	6	15 625	74.6

结果显示,随着随机变量数增加,基于拉丁超立方抽样的模型求解时间从5.24 s上升到8.64 s,变化不大,计算效率较高;而基于场景树抽样的模型求解时间从0.28 s上升到74.6 s,呈指数增长的趋势,这是场景树抽样的“维数灾”现象^[20]。当随机变量数大于5时,基于拉丁超立方抽样的场景生成方法的模型求解效率的优势更加明显。

5 结论

本文建立三端SOP的拓扑结构和数学模型,并考虑端口内部的拓扑结构对端口损耗系数的影响,建立基于概率多场景的鲁棒运行优化模型,提出基于拉丁超立方抽样的概率多场景生成方法。在3组IEEE 33节点系统组成的算例上,通过仿真分析得出以下结论。

(1)三端SOP可以通过控制3条网络馈线之间的有功潮流并提供无功功率,来提高配电网的电压安全性和运行经济性。

(2)三端SOP的故障适应能力强,当某端口发生故障形成双端结构,在极限场景下仍能保证系统中节点电压不越限。相比于双端结构,三端结构下的系统网损明显较小,说明三端SOP可以使馈线之间的功率交换更加灵活,网损经济性更好。

(3)基于概率多场景的鲁棒运行优化模型,能够保证源荷波动最大的场景下不会出现节点电压越限的情况,表现出良好的鲁棒性,且在运行经济性上优于传统鲁棒运行优化模型,很好地实现了配电网经济性和安全性的平衡。

(4)拉丁超立方抽样在概率多场景生成方面具有良好的精度和可靠性,抽样结果覆盖于整个分布区间,通过将拉丁超立方抽样、Cholesky分解、同步回代削减相结合,在随机变量数较大时,模型的计算效率得到显著提高,有效避免了“维数灾”现象。

本文提出的模型和方法具有很好的实用性,实现了配电网运行经济性与安全性的协调,并在模型计算效率上得到显著提高,为柔性开关在配电网中的实际应用提供了理论和技术参考。随着电力市场的进一步开放,分布式电源不仅有随机性和波动性,还具有一定的可控性,作为第三方主体参与配电网运行优化,如何协调分布式电源进行鲁棒运行优化还需进行深入研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 马钊,周孝信,尚宇炜,等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报,2015,35(6):1289-1298.
MA Zhao,ZHOU Xiaoxin,SHANG Yuwei,et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(6):1289-1298.
- [2] 张国荣,陈夏冉. 能源互联网未来发展综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):1-7.
ZHANG Guorong,CHEN Xiaran. Future development of energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(1):1-7.
- [3] 蔡游明,李征,蔡旭. 以并网点电压和机端电压平稳性为目标的风电场无功电压协调控制[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):166-173.
CAI Youming,LI Zheng,CAI Xu. Coordinated control of reactive power and voltage for wind farm aiming at voltage stability of PCC and generator terminal[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(8):166-173.
- [4] 王成山,宋关羽,李鹏,等. 基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J]. 电力系统自动化,2016,40(22):168-175.
WANG Chengshan,SONG Guanyu,LI Peng,et al. Research and prospect for soft open point based flexible interconnection technology for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(22):168-175.
- [5] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing photovoltaic penetration with local energy storage and soft normally-open points[C]//Power & Energy Society General Meeting. [S.l.]:IEEE,2011:1-8.
- [6] 晏阳,廖清芬,胡静竹,等. 基于SNOP的主动配电网多时间尺度优化策略[J]. 电力建设,2016,37(2):125-131.
YAN Yang,LIAO Qingfen,HU Jingzhu,et al. Multi-time scale optimization strategy of active distribution network based on SNOP[J]. Electric Power Construction,2016,37(2):125-131.
- [7] 王成山,孙充勃,李鹏,等. 基于SNOP的配电网运行优化及分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):82-87.
WANG Chengshan,SUN Chongbo,LI Peng,et al. SNOP-based operation optimization and analysis of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(9):82-87.
- [8] 赵金利,李雨薇,李鹏,等. 基于二阶锥规划的有源配电网SNOP电压无功时序控制方法[J]. 高电压技术,2016,42(7):2134-2141.
ZHAO Jinli,LI Yuwei,LI Peng,et al. Sequential voltage regulation of soft normally open point in active distribution network based on second-order cone programming[J]. High Voltage Engineering,2016,42(7):2134-2141.
- [9] 王永杰,吴文传,张伯明. 考虑负荷量测和光伏不确定性的主动配电网鲁棒电压控制[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):138-

144.
WANG Yongjie, WU Wenchuan, ZHANG Boming. Robust voltage control model for active distribution network considering load and photovoltaic uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 138-144.
- [10] CAO W, WU J, JENKINS N, et al. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation[J]. Applied Energy, 2016, 164: 245-257.
- [11] 何耀耀, 闻才喜, 许启发. 基于Epanechnikov核与最优窗宽组合的中期电力负荷概率密度预测方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 120-126.
HE Yaoyao, WEN Caixi, XU Qifa. Mid-term power load probability density forecast based on Epanechnikov kernel and optimal window bandwidth[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 120-126.
- [12] 杨楠, 崔家展, 周峥, 等. 基于模糊序优化的风功率概率模型非参数核密度估计方法[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 335-340.
YANG Nan, CUI Jiazhao, ZHOU Zheng, et al. Research on nonparametric kernel density estimation for modeling of wind power probability characteristics based on fuzzy ordinal optimization[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 335-340.
- [13] 季一润, 袁志昌, 赵剑锋, 等. 一种适用于柔性直流配电网的电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 335-341.
JI Yirun, YUAN Zhichang, ZHAO Jianfeng, et al. A suitable voltage control strategy for DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 335-341.
- [14] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: relaxations and convexification-part II[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2565-2572.
- [15] TAYLOR J A, HOVER F S. Convex models of distribution system reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1407-1413.
- [16] KONSTANTELOS I, GIANNELOS S, STRBAC G. Strategic valuation of smart grid technology options in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1293-1303.
- [17] 李智诚, 吴建中, 和敬涵, 等. 软常开点的双闭环控制及其在配电网中的应用[J]. 智能电网, 2013, 1(1): 49-55.
LI Zhicheng, WU Jianzhong, HE Jinghan, et al. Dual closed-loop control of soft normally open points and its application in distribution networks[J]. Smart Grid, 2013, 1(1): 49-55.
- [18] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 考虑分布式电源运行特性的有源配电网智能软开关 SOP 规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1889-1896.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Optimal configuration of soft open point for active distribution network considering the characteristics of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1889-1896.
- [19] JOHAN L. Modeling and solving uncertain optimization problems in YALMIP[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 1337-1341.
- [20] 马溪原. 含风电电力系统的场景分析方法及其在随机优化中的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
MA Xiyuan. Scenario analysis and stochastic programming of wind-integrated power systems[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.

作者简介:



王志强

王志强(1967—),男,吉林长春人,副教授,硕士,主要研究方向为电力系统运行控制、电力系统继电保护(E-mail: wwwgode@163.com);

方正(1994—),男,江西上饶人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与优化(E-mail: ncepu_fangzheng@163.com);

刘文霞(1967—),女,吉林长春人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统规划与可靠性评估、电力系统运行与优化(E-mail: liuwenxia001@163.com)。

Robust operation optimization of flexible distribution network based on probabilistic multi-scenario

WANG Zhiqiang¹, FANG Zheng¹, LIU Wenxia¹, WANG Lingfei¹, WANG Chaoliang², XU Feng²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The traditional regulating devices and methods show limitation due to the access of distribution generators and fluctuating loads, and the application of SOP (Soft Open Point) can solve the problems caused by the intermittent sources and loads. Aiming at the application of multi-terminal flexible interconnection equipment in flexible distribution network, the topological structure and mathematical model of three-terminal SOP are built with the consideration of operation loss. Since the output uncertainty of sources and loads will lead to node voltage violation and unreasonable power flow of distribution network, a robust operation optimization model based on probabilistic multi-scenario is established with the combination of robust optimization and scene analysis method, which is solved by conic optimization method. In order to realize rapid generation of multi-scenario with the balance of scene number and accuracy, a probabilistic multi-scenario generation method based on Latin hypercube sampling is proposed. The distribution network consisting of three IEEE 33-bus systems is taken as an example to verify the effectiveness of the proposed model and method, which realizes the coordination of economy and safety of distribution network operation, improves the model computational efficiency significantly, and avoids the phenomenon of "dimensional disaster" effectively.

Key words: flexible distribution network; three-terminal SOP; probabilistic multi-scenario; robust operation optimization; Latin hypercube sampling

附录 A：核密度估计方法的具体步骤

采用核密度估计方法分析负荷和能源出力的历史数据，具体步骤如下。

a.密度函数估计。取短期时间段内的历史数据，利用下式计算出各时间点的预测误差密度函数 $f_c(x)$ 的值并画出曲线。

$$f_c(x) = \frac{1}{Ch_c} \sum_{i=1}^C K\left(\frac{x-x_i}{h_c}\right)$$

其中， $K(\cdot)$ 为 $\mathbf{R}$ 中的核函数； $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为母体 X 的简单子样； C 为样本总量； h_c 为窗宽， h_c 越大，在 x 附近领域出现的概率越大； $f_c(x)$ 为母体 X 的概率密度函数 $f(x)$ 的估计。

b.密度函数的正态拟合。曲线的形状基本接近于正态分布曲线，这说明预测误差基本服从正态分布，利用正态曲线来拟合 $f_c(x)$ ，可估计出正态分布的方差系数。

c.统计检验。判断拟合出的正态分布函数是否可以接受，通常采用皮尔逊定理进行 χ^2 检验。

附录 B：同步回代削减的具体步骤

N 表示原始场景个数，场景 $\omega^{(i)}$ 被定义为一个序列：

$$\omega^{(i)} = (\lambda_1^{(i)}, \lambda_2^{(i)}, \dots, \lambda_s^{(i)}, \dots, \lambda_N^{(i)})$$

其中， $\lambda_s^{(i)}$ 为场景 $\omega^{(i)}$ 下第 s 个变量的数值。

$\pi^{(i)}$ 表示场景 $\omega^{(i)}$ 发生的概率，由于拉丁超立方抽样在值域区间均匀抽样，所以抽样所得值的概率是相同的，即 $\pi^{(i)} = 1/N$ ，满足性质 $\sum \pi^{(i)} = 1$ 。

场景 $\omega^{(i)}$ 和场景 $\omega^{(j)}$ 的“范数距离”为：

$$d(\omega^{(i)}, \omega^{(j)}) = \sqrt{\sum_{s=1}^N (\lambda_s^{(i)} - \lambda_s^{(j)})^2}$$

同步回代削减法的步骤如下。

a. 确定需要削减的场景，剔除满足如下条件的场景 $\omega^{(i)}$ ， $s \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。

$$\pi^{(s)} \min_{s \neq s^*} d(\omega^{(s)}, \omega^{(s^*)}) = \min_{i \in \{1, 2, \dots, N\}} \left[\min_{j \neq i, j \in \{1, 2, \dots, N\}} \pi^{(i)} d(\omega^{(i)}, \omega^{(j)}) \right]$$

这种启发式方法考虑了场景间的距离和概率，使得更容易剔除相近的、小概率且不具有代表性的场景。

b. 改变场景总数 $N = N - 1$ ，改变与被剔除的场景 $\omega^{(s)}$ 最近的场景的概率，保证剩余场景概率之和为 1。

$$\pi^{(s^*)} = \pi^{(s^*)} + \pi^{(s)}$$

c. 若削减后的场景总数 N 仍大于需要的场景总数，重复执行步骤 **a**、**b**。

附录 C：算法流程图

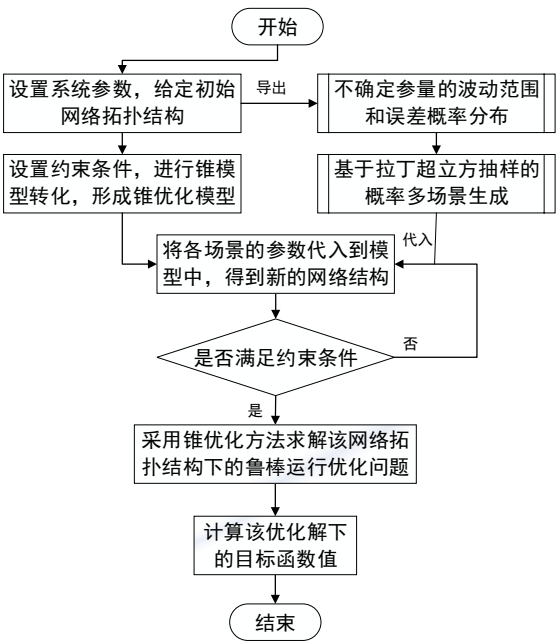


图 C1 算法流程图

Fig.C1 Flowchart of algorithm