考虑最优负荷削减方向的电网多目标分层 随机机会约束规划

谢仕炜,胡志坚,宁 月

(武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要:提出了一种含机会约束的电网多目标分层随机规划模型。以最优负荷削减量和电压稳定裕度乐观值为 上层优化目标、网络损耗期望值为下层优化目标。用最危险负荷增长模式计算静态最小电压稳定裕度,并提 出了计算最优负荷削减方向的方法。将最优负荷削减方向作为约束条件之一,采用基于拉丁超立方抽样的蒙 特卡洛模拟嵌入非支配排序遗传算法求解含机会约束的多目标分层优化模型。基于 IEEE 39 节点系统仿真, 结果表明所提方法在保证经济性的同时,能够有效提高电网安全水平和电压稳定裕度。

关键词:最优负荷削减方向;多目标分层规划;机会约束规划;随机模拟;电压稳定;优化

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.005

0 引言

中图分类号: TM 715

新能源和新负荷^[13]接入电网比例增高,加剧了 电网注入功率的随机性和不确定性,使得电网的安全 稳定性面临更大的挑战。传统的稳定性分析理论多 是基于固定场景,系统的确定性潮流优化算法多是建 立在固定网络结构、负荷功率参数及恒定分布式电源 输出的前提下,难以用其对新能源和负荷的随机波动 性进行建模。为保证新环境下电网的安全稳定运行, 迫切需要研究考虑各种不确定因素的稳定性分析方 法,并建立优化策略。考虑到确定性方法求解随机问 题的不足,目前对电力系统不确定性问题的研究,主 要依托于概率分析方法,包括蒙特卡洛模拟法、点估 计法及解析法。

许多学者在研究过程中,将传统的稳定性分析方法与概率方法相结合,提出了电压稳定概率的分析方法。文献[4]计及了随机变量相关性,利用最大熵估计法获取负荷裕度的概率分布来衡量系统电压稳定概率。文献[5]考虑了双馈异步风电机组在恒定电压运行方式下的无功极限,构建了更为合理的静态电压稳定概率分析模型,从而求解多约束负荷稳定裕度指标。文献[6]提出了基于局部电压稳定L指标对系统薄弱环节进行识别的方法,进而给出了静态电压失稳风险评估指标。上述研究虽然考虑了系统注入功率的不确定性,但其电压稳定评估是基于负荷裕度的求解,忽视了负荷增长方式给求解结果带来的影响。

考虑稳定分析方法的同时,需寻求有效的优化策 略以提高电网的安全稳定性。近年来,有学者提出采 用随机最优潮流来解决随机不确定因素作用下的优 化问题。随机最优潮流的建模过程考虑随机因素的 影响「¹⁰¹」以机会约束条件来模拟随机变量对系统的 影响,使得优化结果受随机因素影响。文献[8]将负 荷和风机出力作为随机变量,以期望发电成本和机 组的出力调整费用最小为目标函数,建立了含机会约 束的最优潮流模型,但其采用调整约束范围的迭代 求解方法并不能适用于所有场合。文献[9]建立两阶 段的随机最优潮流模型,将系统的网络损耗作为优 化目标,但模型的求解依赖于场景的划分,若使用简 单模拟过程将导致计算效率较低。文献[10]提出了 一种基于机会约束规划的主动配电网随机最优潮流 优化模型,对比了考虑主动管理的双层机会约束规划 与确定性边界规划的优化结果,证明了所提方法更具 优越性,但未考虑电压稳定裕度约束的影响。

值得注意的是,针对新能源和新负荷的随机波动, 目前的研究鲜有利用随机规划分析电网稳定性和考 虑负荷削减方向约束来制定优化策略。本文提出一 种考虑最优负荷削减方向的多目标分层随机机会约 束规划模型。采用最危险的负荷增长模式计算电压 稳定裕度,将最优负荷削减方向作为模型的约束条件, 采用基于拉丁超立方采样^[11-12]的蒙特卡洛模拟 LHS-MCS (Latin Hypercube Sampling-based Monte Carlo Simulation)嵌入非支配排序遗传算法^[13-14]NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)求解该 模型。先求得上层规划目标的 Pareto 最优解集^[15-16] 作为下层规划的可行域,进一步求解下层目标函数, 从而获取最终的优化结果。

1 随机环境下的最优负荷削减方向

当系统存在稳定性安全隐患时,采用主动的负荷 削减策略能够提高系统的稳定性。考虑负荷和新能

收稿日期:2017-04-08:修回日期:2017-06-17

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(201101411-10032)

Project supported by the Special Scientific and Research Funds for the Doctoral Program of Higher Education(20110141110032)

1.1 最危险负荷增长方向

传统基于连续潮流的电压稳定裕度的求解过 程,大多预先给定负荷增长方式^[16-17]。实际上,接入 系统的新负荷与分布式能源具备高度随机性和间歇 性,采用固定负荷增长模式计算电压稳定裕度指标, 结果将过于乐观,不能有效地反映系统的稳定性^[18]。

不同负荷增长方式对应不同的系统崩溃点,所 有崩溃点集合构成系统临界运行超平面空间。最危 险负荷增长方向是指从系统运行点到运行边界超平 面的最短距离所对应的向量方向,表征使系统最快失 去稳定的负荷增长方向。

定义临界运行超平面为 Σ ,负荷参数为 λ 。设系统 PQ 节点个数为m,负荷注入功率及临界超平面均属于多维欧拉空间,即 $\Sigma \epsilon R^{m-1}$ 且 $\lambda \epsilon R^m$ 。若 $\Delta S_i = \Delta P_i + j \Delta Q_i$ 表示系统中单一节点负荷增长方向,故寻找最危险负荷增长方向可归结为在m维负荷增长方向构成的空间 $S = \{\Delta S_1, \Delta S_2, \cdots, \Delta S_m\}$ 中求解系统运行点到m-1维临界超平面最短距离的单位向量。

为了说明求解方法,图1给出了三维的负荷超平 面空间。图中, Σ 构成临界超平面, $\lambda_k(k=1,2,\dots,m)$ 位于 Σ 上, $n_{\Sigma}(\lambda_k)$ 为 λ_k 在 Σ 上的法向量。随机因素 的影响可以在负荷增长空间中表示为初始运行点 λ_0 在某一超维领域范围 $\delta(\delta \in \mathbb{R}^m)$ 内的波动,即用闭球 空间集合表示:

$$\Pi(\boldsymbol{\lambda}_0, \boldsymbol{\delta}) = \{ \boldsymbol{x}_j \in \mathbf{R}^m | \| \boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{\lambda}_0 \| < \boldsymbol{\delta} \}$$
(1)



Fig.1 3-dimensional hyperplane space of load 临界超平面可表示为内积集合.

$$\sum = \{ \boldsymbol{\lambda} \in \mathbf{R}^{m} | \langle \boldsymbol{n}_{\Sigma}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\lambda}), \boldsymbol{\lambda} \rangle = 0 \}$$

 $\sum = \{ \boldsymbol{\lambda} \in \mathbf{R}^{m} | \langle \boldsymbol{n}_{\Sigma}^{*}(\boldsymbol{\lambda}), \boldsymbol{\lambda} \rangle = 0 \}$ (2) ith $\boldsymbol{\Pi}$ 中任意点到 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的负荷增长方向集合为 $\boldsymbol{\eta}_{i}^{r} = \overline{\boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{x}_{i}}, \boldsymbol{\eta} \boldsymbol{\Pi}$ 空间内点集 \boldsymbol{x}_{q} 到 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的距离平方和为:

$$S^{2} = \sum_{j=1}^{k} \boldsymbol{d}_{j}^{2} = \sum_{j=1}^{k} \boldsymbol{\eta}_{j}^{\mathrm{T}} (\boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{x}_{j})$$
(3)

对式(3)中系统的状态变量 x_q 求偏导,可得极值条件:

$$\sum_{j=1}^{k} 2\boldsymbol{\eta}_{j}^{\mathrm{T}} \frac{\partial \boldsymbol{\lambda}}{\partial \boldsymbol{x}_{q}} = 0 \quad q = 1, 2, \cdots, 2m-1$$
(4)

集合 Π 内的样本点是随机的, 服从期望为 λ_0 的

空间分布且彼此不相关,故有:

$$\sum_{j=1}^{k} 2\boldsymbol{\eta}_{j}^{\mathrm{T}} \frac{\partial \boldsymbol{\lambda}}{\partial \boldsymbol{x}_{q}} = 2k \boldsymbol{\eta}_{0}^{\mathrm{T}} \frac{\partial \boldsymbol{\lambda}}{\partial \boldsymbol{x}_{q}} = 0$$
(5)

即当 $\eta_0^T = \overline{\lambda - x_0} = \Sigma$ 法向量平行时, S^2 取得极小 值,此时 $\lambda_k = \lambda_*, \eta_0^T = n_{\Sigma}^T (\lambda_*)$ 同相。实际上, $\partial \lambda / \partial x_q$ 即 为系统的雅可比矩阵,当负荷增长到 $\lambda_* = \lambda_0 + d_0 \eta_0^T$ 时,运行点位于临界超平面上,雅可比矩阵将首先出 现零特征值,此时 d_0 为对应的最短路径。

构造如下等式:

$$\boldsymbol{\eta}_{0}^{\mathrm{T}} \frac{\partial \boldsymbol{\lambda}}{\partial \boldsymbol{x}_{q}} = 0 \times \boldsymbol{\eta}_{0}^{\mathrm{T}}$$

$$(6)$$

可知此时 η⁵ 为奇异雅可比矩阵的零特征值对 应的左特征向量,其指示最危险负荷增长方向。

1.2 最优负荷削减方向

电网的安全稳定运行要求系统具有足够的负荷 裕度。当系统负荷裕度不足时,需采用主动削减负 荷的策略来提高裕度。基于上述最危险负荷增长模 式,本文提出了随机环境下最优负荷削减方向的求 解方法。

任取 Π 集合内一点 x_i ,其距离临界超平面的最短路径为 $\lambda_i = x_i + d_i \eta_i^T$, λ_i 位于 Σ 上。设超平面的光滑实函数为 $\varphi(\lambda) = 0$,故 $\varphi(\lambda_i) = \varphi(x_i + d_i \eta_i^T) = 0$ 。对 $\varphi(\lambda_i)$ 求导可得:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \boldsymbol{\lambda}_{i}} \left(\boldsymbol{d}_{i} + \frac{\partial \boldsymbol{d}_{i}}{\partial \boldsymbol{\eta}_{i}^{\mathrm{T}}} \boldsymbol{\eta}_{i}^{\mathrm{T}} \right) = 0$$
(7)

显然, $\partial \varphi / \partial \lambda_i = n \Sigma(\lambda_i)$ 为 λ_i 在 Σ 上对应的法向量,即 最危险负荷增长方向。路径距离 d_i 表征着负荷裕度, $\partial d_i / \partial \eta_i^T$ 表征负荷裕度对增长方向的变化率,即为负 荷削减对应方向。

化简式(7),得:

$$\frac{\partial \boldsymbol{d}_i}{\partial \boldsymbol{\eta}_i^{\mathrm{T}}} = -\boldsymbol{n}_{\boldsymbol{\Sigma}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\lambda}_i) \left[\boldsymbol{d}_i \left(\left\langle \boldsymbol{n}_{\boldsymbol{\Sigma}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\lambda}_i), \boldsymbol{\eta}_i^{\mathrm{T}} \right\rangle \right)^{-1} \right]$$
(8)

其中, $d_i(\langle n_{\Sigma}(\lambda_i), \eta_i^{\mathsf{T}} \rangle)^{-1}$ 为实常数,故最优负荷削减 方向由 $-n_{\Sigma}(\lambda_i)$ 确定。当且仅当 $n_{\Sigma}(\lambda_i)$ 与 η_i^{T} 方向相 同时, $\langle n_{\Sigma}(\lambda_i), \eta_i^{\mathsf{T}} \rangle$ 取最大,按该方向削减负荷引起 的稳定裕度增长最快,即最优负荷削减方向。

1.3 负荷削减方向求解

在注入功率不确定的情况下,系统的负荷功率 在闭球空间集合 Π 中随机波动。考虑使用模拟法将 随机因素转化为对应不同场景的确定性环境,故在 随机环境下求解最优负荷削减方向的步骤如下。

a. 输入一组负荷功率的随机样本,确定初始运行点 $x_i \in \Pi_o$

b. 假定初始负荷增长方向为 η_{i} ,并将其归一化为 || η_{i}^{T} || =1。

c. 沿 $\boldsymbol{\eta}_{i}^{T}$ 方向增长负荷,直至雅可比矩阵奇异,使得 $\boldsymbol{\lambda}_{i} = \boldsymbol{x}_{i} + \boldsymbol{d}_{i} \boldsymbol{\eta}_{i}^{T}$ 在临界超平面 Σ 上。

d. 对雅可比矩阵进行奇异值分解,找到零特征

37

值对应的左特征向量并作为下一次负荷增长的方 $\boldsymbol{\eta}_{i+1}^{\mathrm{T}}$ 。

e. 重复步骤 **b**一**d**, 直至 $|\eta_{i+1}^{T} - \eta_{i}^{T}| < \varepsilon(\varepsilon)$ 为收敛 系数),负荷增长方向将收敛于最危险负荷增长方向 $n_{\Sigma}^{T}(\lambda_{*})$ 。此时系统稳定临界点为 $\lambda_{*}=x_{i}+d_{i}n_{\Sigma}^{T}(\lambda_{*})$,对 应的 d_{i} 表示最短负荷路径,即最小负荷裕度。

f. 对应该随机场景下的最优负荷削减方向 为-*n*₅(λ_{*})。

2 含最优负荷削减方向约束的多目标分层 随机机会规划模型

当电网存在安全稳定威胁时,主动控制负荷削 减能够使得系统稳定性得到改善。然而,为满足系统 经济运行的要求,应使得负荷的削减量尽可能少。本 文在考虑随机变量作用的前提下,建立以最小负荷 削减量及最大电压稳定裕度的乐观值为上层目标, 以系统网络损耗的期望值为下层目标的多目标分层 随机规划模型。显然,最小化负荷削减量与最大化电 压稳定裕度的目标相互矛盾,规划结果将是一组 Pareto 最优解集。将上层最优解集传递到下层作为 其可行域进行求解,最终可获得规划结果。

2.1 上层规划数学模型

上层规划模型中的规划目标如下所述。

a. 最优负荷削减目标。

$$L_{s,r} = \min \sum_{i \in L_m} \omega_i R_i \tag{9}$$

其中, $L_{s,r}$ 为在系统运行状态s、初始负荷水平为r时的最优负荷削减总量; L_m 为系统负荷节点集合; ω_i 、 R_i 分别为第i个负荷的权重因子、负荷削减量。

b.最大电压稳定裕度乐观值目标。

$$\max \max \lambda_{\rm th} \tag{10}$$

实际上,式(10)是一个 maximax 型^[19]机会约束 规划目标,max $\overline{\lambda}_{\mu}$ 是系统电压稳定裕度 β_{λ} 的乐观 值。乐观值的大小决定了电压稳定裕度概率分布区 间,乐观值越大,稳定裕度落在更大数值范围内的 概率越大。优化乐观值不仅能提高系统的整体稳定 裕度分布水平,同时能保证其在功率波动情况下仍 处于较高水平。

同时进行上述 2 个目标的规划,可描述为求解如 下目标:

$$\min[L_{s,r}(x,\boldsymbol{\xi}) - \max \overline{\lambda}_{th}]$$
(11)

且在系统运行中必须满足如下的约束条件。 a. 功率平衡约束。

$$\begin{cases} \tilde{P}_{G_{i}} = \tilde{P}_{D_{i}} + \tilde{U}_{i} \sum_{j \in i} \tilde{U}_{j} (G_{ij} \cos \tilde{\theta}_{ij} + B_{ij} \sin \tilde{\theta}_{ij}) \\ \tilde{Q}_{G_{i}} = \tilde{Q}_{D_{i}} + \tilde{U}_{i} \sum_{j \in i} \tilde{U}_{j} (G_{ij} \sin \tilde{\theta}_{ij} - B_{ij} \cos \tilde{\theta}_{ij}) \end{cases}$$
(12)
b. 控制变量约束。

$$P_{\text{Gimin}} \leqslant P_{\text{Gi}} \leqslant P_{\text{Gimax}} \quad i \in N_{\text{G}} \tag{13}$$

$$U_{\text{Gimin}} \leqslant \overline{U}_{\text{Gi}} \leqslant U_{\text{Gimax}} \quad i \in N_{\text{G}} \tag{14}$$

$$T_{\min} \leqslant \overline{T}_i \leqslant T_{\max} \quad i \in N_{\text{Trsm}} \tag{15}$$

c. 负荷削减极限约束。

$$0 \leq R_i \leq R_{\max} \quad i \in N_{PQ} \tag{16}$$

d. 最优削减负荷方向约束。

$$[R_1, R_2, \cdots, R_m] = \kappa n_{\Sigma}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\lambda}_*)$$
(17)

$$\Pr\{\lambda(x,\boldsymbol{\xi}) \ge \lambda_{\rm th}\} \ge \beta_{\lambda} \tag{18}$$

$$\Pr\{U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max}\} \geq \alpha_{U_i} \quad i \in N_{PQ}$$
(19)

$$\Pr\{Q_{\text{Gimin}} \leq \widetilde{Q}_{\text{Gi}} \leq Q_{\text{Gimax}}\} \geq \alpha_{Q_i} \quad i \in N_{\text{G}}$$

$$(20)$$

$$\Pr\{I_{ij,\min} \leq \left| \tilde{I}_{ij} \right| \leq I_{ij,\max}\} \geq \alpha_{I_{ij}} \quad ij \in N_{\text{Line}}$$
(21)

式(12)—(21)中,上标"~"表示该变量为随机变 量;上标"–"表示对应随机变量的期望值;下标 min、 max 分别为对应变量的上、下限; P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为发电 机节点注入的有功、无功功率; P_{Di} 、 Q_{Di} 分别为负荷节 点的有功、无功功率; T_i 为节点 i 的变压器分接头的 位置; U_i 为节点 i 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 与节点 j的电压相角差; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 与节点 j间互导 纳的实部、虚部; N_{C} 、 N_{Tesn} 、 N_{PQ} 、 N_{Line} 分别为所有机组、 变压器、PQ 节点、支路的集合;式(17)表示负荷削减 必须遵守最优方向的约束条件, κ 为方向比例因子, $n_{\Sigma}(\lambda_*)$ 为最优削减方向; I_{ij} 为流过支路 i-j 的电流; $\overline{\lambda}(x,\xi)$ 为随机状态下的电压稳定裕度,x 和 ξ 分别为 控制变量和随机向量; $Pr\{\cdot\}$ 表示不等式约束成立的 概率, β_{λ} 、 α_{U_i} , α_Q 、 α_{U_i} 为对应的预设置信水平。

定义 Ω 为满足式(12)—(21)约束的决策空间,则含有2个目标的上层规划最优解集 X^* 可以表示为:

 $X^* = \{x \in \Omega \mid \neg \exists x' \in \Omega, f_j(x') \leq f_j(x), j=1,2\}$ (22) 其中, $x \in \Omega$ 表示 x 属于空间 Ω 中的最优解集; $x' \in \Omega$ 表示空间 Ω 中任意不属于最优解集的决策变量。

2.2 下层规划数学模型

上层规划是为了付出尽可能少的代价(削减负荷)来改善系统电压稳定裕度,属于含机会约束的多目标规划,且由于目标优化方向彼此相反,因此规划结果将是一组最优解集。考虑到电压稳定裕度与网损变化趋势相反^[20],提升电压稳定裕度会同时增大网络损耗,且系统的负荷增减与网络损耗大小并非呈简单线性关系。故本文建立以降低系统的网络损耗期望值为目标的下层规划模型,并将上层最优解集作为可行域,在保证上层规划结果的前提下进行优化。

引入宽容度 γ(γ>0),则以降低网络损耗期望值 为优化目标的下层规划模型可表示为:

$$\min E[f_{loss}(x, \boldsymbol{\xi})]$$

s.t. $X = \{x \in X^* | f(x) \leq f(X^*) + \gamma\}$
 $\tilde{P}'_{Di} = \tilde{P}_{Di} - \cos \varphi_i^* \omega_i R_i^*$
 $\tilde{Q}'_{Di} = \tilde{Q}_{Di} - \sin \varphi_i^* \omega_i R_i^*$
(23)

其中, $f_{loss}(x, \boldsymbol{\xi})$ 为随机场景下的网络损耗; $\tilde{P}_{Di}, \tilde{Q}_{Di}'$ 分别为节点*i*满足最优削减后的有功、无功负荷; φ_i^* 为节点*i*的最优负荷削减方向功率因数角; R_i^* 为最优负荷削减量。

下层规划模型的约束条件基于可行域集合 X*, 仍是含机会约束的随机最优潮流问题。考虑上下层 随机规划过程需保证输入样本的一致性,下层规划 的求解实际上是在上层最优解集 X* 内逐次寻优的 过程。

3 多目标分层随机规划模型混合求解算法

分层求解方法可分解为不同的层次独立求解, 通过最优解集的传递建立彼此之间的联系。本文用 LHS-MCS嵌入 NSGA-II 的混合算法对多目标随机规 划模型进行求解,基于上层规划的最优解集空间进行 寻优从而获得最终决策。

3.1 机会约束规划求解

由大数定律可知,使用随机模拟技术处理机会 约束规划问题能够获得更加准确的结果。但采用简 单的蒙特卡洛模拟法对抽样次数要求较高,计算效 率低。本文用 LHS-MCS 对机会约束进行校验。

3.1.1 机会约束条件校验

用 LHS-MCS 校验形如式(18)—(21)所示的机 会约束条件的步骤如下。

a. 输入系统计算所需参数及 N 组随机样本, 令 $N' = 0_{\circ}$

b.使用 LHS-MCS 对 N 组随机样本进行抽样和 排序。

c. 逐次校验样本,即判断当前系统各节点电压、 无功及支路电流等状态量是否越限,若约束条件满足 则进行计数,即 N' = N' +1。

d. 重复上述步骤直到 N 组样本均校验完毕。若 不等式 N'/N≥α 成立,则认为满足机会约束,否则认 为违反机会约束,其中 α 为给定的各约束的置信水平。 3.1.2 期望值模型

形如式(23)所示的是以期望值为目标的规划模型,并且约束条件中的式(13)—(15)也是以控制变量的期望值作为被约束对象,属于随机期望值模型。设 f(x, \xi)为目标函数,g_i(x, ξ)为随机约束函数,则该 类模型可以表示为:

$$\begin{cases} \min E[f(x,\boldsymbol{\xi})] \\ \text{s.t. } E[g_j(x,\boldsymbol{\xi})] \leq 0 \quad j=1,2,\cdots,p \end{cases}$$
(24)

形如式(24)所示的期望值算子可以转化为多重

积分表达式,从而有:

$$E[f(x,\boldsymbol{\xi})] = \int_{\mathbf{R}} f(x,\boldsymbol{\xi}) \,\phi(\boldsymbol{\xi}) \,\mathrm{d}\boldsymbol{\xi}$$
(25)

$$E[g_j(x,\boldsymbol{\xi})] = \int_{\mathbf{R}} g_j(x,\boldsymbol{\xi}) \,\phi(\boldsymbol{\xi}) \,\mathrm{d}\boldsymbol{\xi} \quad j=1,2,\cdots,p \ (26)$$

式(25)和(26)表示在实数域 **R**上的积分。其 中,*p*为约束条件个数;*ξ*为 *N* 维随机向量;*φ*(*ξ*)为随 机向量*ξ*的概率密度函数。

当*ξ*维数较高时,用迭代方法求解上述含随机 变量的积分表达式的精度往往不能满足要求。考虑 到随机模拟计算精度只与抽样次数有关、与维度大 小无关,且求解过程和机会约束校验可以同时进行, 本文用如下表达式作为积分的估计值:

$$E[f(x,\xi)] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} f(x,\xi_i)$$
(27)

$$E[g_j(x,\boldsymbol{\xi})] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} g_j(x,\boldsymbol{\xi}_i)$$
(28)

3.1.3 Maximax 型机会约束规划

上层规划将电压稳定裕度的乐观值作为规划目标,属于 Maximax 型机会约束规划,其规划模型如下:

$$\begin{cases} \max_{x} \max \overline{\lambda}_{th} \\ \text{s.t.} \quad \Pr\{\overline{\lambda}(x, \boldsymbol{\xi}) \ge \overline{\lambda}_{th}\} \ge \beta_{\lambda} \\ \Pr\{g_{j}(x, \boldsymbol{\xi}) < 0\} \ge \alpha_{j} \quad j = 1, 2, \cdots, p \end{cases}$$
(29)

对模型进行优化求解过程中,需要对目标值 $\overline{\lambda}_{\mu}$ 进行计算。考虑到目标不能简单地通过函数求解获得,本文仍用LHS-MCS来求解目标值,具体步骤如下:

a. 生成服从各自概率分布 $\phi(\xi)$ 的 *N* 组随机向 $\mathbb{E}[\xi_1,\xi_2,\dots,\xi_N];$

b. 使用 LHS-MCS 对上述样本进行抽样和排序;

c. 将 $\overline{\lambda}_i = \lambda(x, \xi_i)$ 按照从大到小的顺序排列,可获得序列{ $\overline{\lambda}_1, \overline{\lambda}_2, \dots, \overline{\lambda}_N$ };

d. 令 *N*" = $\beta_{\lambda}N$ 为整数部分,返回序列中的第 *N*" 个元素作为估计值,即 $\overline{\lambda}_{h} = \overline{\lambda}_{N}$ 。

3.2 NSGA-II

NSGA-Ⅱ^[21-22]在处理多目标问题方面得到了广 泛应用。本文利用该算法处理上层规划中的多目标 问题,具体实现的主要方法如下。

a. 编码。本文采用实数和整数编码混合的形式,控制变量中的发电机有功出力、机端电压、负荷 削减量采用实数编码;变压器分接头位置使用整数 编码。则控制变量可表示为:

 $[P_{G1},\cdots,P_{GN_G}|U_{G1},\cdots,U_{GN_G}|R_1,\cdots,R_m|T_1,\cdots,T_{N_{Tsm}}] (30)$

b. 构造非支配集。对种群 P_{op} 进行非支配分类 排序的目的是使得划分后的子群 P_1, P_2, \dots, P_l 能满 足以下性质: $P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_l = P_{op}$; $\forall i, j \in \{1, 2, \dots, l\}$ 且 $i \neq j, P_i \cap P_i = \emptyset; P_1 > P_2 > \dots > P_l$, 即 P_{k+1} 中个体直接 $\mathcal{G}P_k(k=1,2,\cdots,l)$ 中个体支配。

快速构造满足上述条件的非支配集的主要步骤 包含:构造 $\{n_i\}$ 和 $\{S_i\}, n_i$ 记录支配个体i的个体数, S_i 记录被个体i支配的个体的集合;通过二重循环计算 方法可获取每个个体的 n_i 和 S_i ;找到种群中 $n_i=0$ 的 个体,则 $P_1=\{i|n_i=0, i \in \{1, 2, \cdots, l\}\},$ 并按 $P_k=\{$ 所有 个体 $i|n_i-k+1=0\}$ 确定 P_1, P_2, \cdots, P_i 。

c. 计算聚集距离。为 保持解群体的分布性和多 样性,通过计算进化群体中 每个个体的聚集距离,并 结合个体所处层次构造偏 序集,可在偏序集依次选择 个体生成新的种群。如图 2 所示,设有 2 个子目标 f₁ 和 f₂,则个体 *i* 的聚集距离为 图中虚线框的长和宽之



图 2 个体间的聚集距离 Fig.2 Crowding distance among individuals

和。设 *P*[*i*]*f* 为个体*i* 在子目标*f*上的函数值,则个体*i* 聚集距离的计算公式为:

 $dP_i = P[i+1]f_1 - P[i-1]f_1 + P[i+1]f_2 - P[i-1]f_2 (31)$

d. 精英策略。精英策略的核心思想是保留适应 度强的父代直接进入子代。实现方法为:进行每次进 化并获得子代种群 Q_i ,保留前一代父代种群 P_i ,形成 新的种群 $R_i = P_i \cup Q_i$;构造种群 R_i 的非支配集,并计 算种群所有个体的聚集距离,依据支配等级的高低逐 一选取个体,直到个体数量达到种群个体数时则形成 新的父代种群 P_{t+1} ;以 P_{t+1} 为父代种群,经过选择、交 叉、变异可以形成新的子代种群 Q_i 。

3.3 LHS-MCS 嵌入 NSGA-Ⅱ的混合求解算法

本文提出了最优负荷削减方向的计算方法,并 作为模型的约束条件之一。结合上述 LHS-MCS 和 NSGA-II等方法求解所提模型,上层染色体的适应度 为负荷削减量期望值和电压稳定裕度乐观值,下层染 色体适应度为网络损耗期望值,将上层规划获得的 Pareto 最优解集作为下层规划的可行域。具体的算 法流程如图 3 所示。

4 算例分析

本文以标准 IEEE 39 节点系统为仿真算例,系统结构如图 4 所示。

4.1 算例输入参数

a. 风电机组参数。风机接入点为节点 32、34,设 其相关性系数为 0.5;假定每台风电机组的额定功率 均为 200 MW;输入风速服从威布尔分布,形状参数 取 9,尺度参数取 2.15,切入风速、切出风速、额定风 速分别取 3 m/s、14 m/s、25 m/s。

b.负荷参数。设系统所有负荷服从正态分布,期



图 3 算法流程图





图 4 IEEE 39 节点测试系统 Fig.4 IEEE 39-bus test system

望值为原系统负荷功率,方差为0.5。

c. 遗传算法参数。设最大进化代数为 100,种群 规模为 60,交叉率取 0.6,变异率取 0.15。

d.随机模拟和相关约束参数。设LHS-MCS 模拟 次数为1000次;置信水平 $β_{\lambda}$ 取65%, $α_{U_{i}}$ 、 $α_{Q_{i}}$ 、 $α_{l_{i}}$ 均 取为95%,宽容度γ取目标函数的15%;系统各节 点电压约束范围为[0.94,1.06] p.u.,发电机有功和 无功约束范围为原始出力的±20%,变压器分接头位 置上下限为原始接头位置的±5%,线路电流约束范 围为[0,1.5] p.u.。



使用 LHS-MCS 随机抽样法, 对服从威布尔分布

的风速样本、风电机组出力和负荷进行抽样,相关结

Fig.5 Stochastic samples of wind speed, wind power and load

4.3 最危险负荷增长方向的仿真结果

通过计算最危险负荷增长方向,可以同时获得最 优负荷削减方向。本文计算最小电压稳定裕度时,均 考虑以最危险方向增长负荷。限于篇幅,表1给出某 一场景下前10个负荷节点的最危险增长方向,其计 算过程迭代次数为6次,并将负荷方向向量归一化。

	表]	最危险负	荷增	长方向	
Table 1	Most	dangerous	load	growth	direction

负荷节点	有功负荷方向	无功负荷方向	比值
1	0.160882	0.002988	53.8427
2	0.161 895	0.008444	19.1728
3	0.140370	0.073294	1.9152
4	0.159383	0.052201	3.0533
5	0.164459	0.022483	7.3148
6	0.129098	0.076569	1.6860
7	0.148172	0.075012	1.9753
8	0.153 549	0.071623	2.1439
9	0.159827	0.023951	6.6731
10	0.133480	0.045192	2.9536

通过表1的求解结果可知,任意节点的有功和无 功功率在负荷超平面空间中构成了一个单位增长方 向,若该节点按照此方向增长将比任意方向增长更容 易达到电压临崩溃超平面,即按表1的单位方向增长, 系统最快失去电压稳定。

采用最危险方向的负荷增长模式,可以确定任意 场景下的最小电压稳定裕度(标幺值,后同)。为说明 采用该方法在不确定环境下获得的稳定裕度指标优 于传统负荷增长模式,图6给出了分别使用最危险负 荷方向增长负荷以及使用同比例负荷增长模式计算 获得的电压稳定裕度概率密度分布。



由图 6 可知,在同一组样本环境下,使用同比例 负荷增长方式计算得到的电压稳定裕度概率密度分 布数值整体上大于本文方法。当负荷增长具有随机 性时,用传统方法获得的结果明显过于乐观,证明用 本文方法求得的电压稳定裕度结果在概率分布上更 具有客观性。

4.4 多目标分层随机机会约束规划模型求解

采用本文所提算法求解多目标优化模型,可获得上层规划的 Pareto 最优解集。图 7 给出了某场景下求得的 Pareto 最优前沿,图中电压稳定裕度乐观值相反数为标幺值。



基于上述最优前沿对应的最优解集可对下层规 划进行求解。求解该模型,并对比采用最优负荷方向 削减与随机负荷方向削减的计算结果,如表2所示, 表中负荷削减量、电压稳定裕度乐观值、电压稳定裕

随机模拟抽样结果

4.2

表 2 多目标分层规划结果 Table 2 Results of multi-objective hierarchical planning

不同负荷 削减方向	负荷 削减量	网络损耗 期望值/ MW	电压稳定 裕度 乐观值	电压稳定 裕度 期望值	违反 机会 约束/%	优化 时间/s
最优方向	13.558	23.234	1.0785	1.0795	0	264.67
随机方向1	19.916	24.414	1.0670	1.0268	0	268.49
随机方向2	16.343	28.695	0.9524	0.9859	0	263.43
优化前	0	39.077	0.6464	0.6586	39	

度期望值均为标幺值。

由表2可看出,在系统基本运行状态下,将出现 大量违反机会约束的情形,且主要是由于节点电压在 功率波动时不能总是满足限制。用本文所提模型进 行优化后,能保证系统功率在一定范围内波动时不违 反机会约束条件。用本文所提最优负荷削减方向约 束的模型进行求解,系统的网络损耗期望值减少了 约40.54%,电压稳定裕度乐观值提高了约66.85%, 期望值提高了约 63.90%,说明本文方法使得系统安 全稳定性(电压稳定裕度)提升的同时,能够降低系 统的网络损耗。通过对比使用最优负荷削减方向和 使用随机负荷削减方向的优化结果可以看出,本文 方法通过最少的负荷削减量,获得了最大的稳定性 提高。虽然用随机削减方向1求得的电压稳定裕度 结果和网损期望值与最优削减方向较为接近,但付 出了更大的负荷削减代价:虽然随机削减方向2的 负荷削减量比方向1少,但对网损的优化及稳定性 的提升均不够理想。

此外,表 2 中还给出了算法的计算时间。由于算 法的计算时间主要集中在随机规划上,因此优化过 程计算量较大。本文使用的 LHS-MCS 法,在获得同 样精度时相比未使用拉丁超立方采样大幅减少了模 拟次数。实际上,采用 MCS 法要获得与表 2 精度相 同的结果,需要迭代 1 500~1 600 次,共需要时间 521.3 s。通过实验发现,若将该算法用于 IEEE 118 节点系统,仅需要 441.27 s 即可获得目标优化结果。 虽然增加系统规模可能引起优化时间的增加,但显 然相比增加模拟次数对时间的影响更低,且本文所 提算法计算时间基本能满足工程上规划的要求。

使用上述最优负荷削减方向,对图 6(b)所示的 情形进行优化,可获得优化后系统电压稳定裕度的 概率密度分布如图 8 所示。相比于图 6(b),系统的 电压稳定裕度的概率分布有了明显的提升;且使用乐 观值作为目标进行规划,能保证电压稳定裕度的概率 尽可能往数值大的方向分布,即使负荷波动范围较大, 优化后电压稳定裕度可能的最小值也不小于 0.9 p.u., 证明该方法能够适应系统负荷等功率的波动,在不确 定环境下能够提高系统的稳定性。

综上,新能源和新负荷随机波动下,本文方法能够有效提高系统当前稳定性,且通过模型计算能够





使用尽可能少的负荷削减获得最大的稳定性的提升,保证了系统的安全性和经济性。

5 结论

本文提出了考虑最优负荷削减方向的多目标 分层随机约束规划模型,采用基于 LHS-MCS 嵌入 NSGA-II 的混合算法实现了对所提模型的求解。利 用 IEEE 39 节点系统验证了所提模型和求解方法的 有效性。得到的结论如下。

a. 本文提出了在随机不确定环境下,使用最危险 负荷增长模式计算电压稳定裕度的概率分布。算例 分析表明用传统的同比例负荷增长模式计算所得结 果过于乐观,而用本文方法可获得更加客观的结果。

b. 本文提出的多目标分层随机机会约束规划模型,能够在系统运行存在风险时,提高系统的安全稳定性。通过尽可能少的主动负荷削减提升了系统电压稳定裕度概率分布,同时优化了系统的网络损耗,即保证了系统的安全稳定性和经济性。算例仿真表明该方法适用于新能源和新负荷接入系统的随机环境,并从概率角度提高了系统性能。

c. 本文所提多目标分层随机规划算法所需的计 算时间基本符合工程上的规划要求。如何进一步提 高计算效率也是今后研究的一个方向。

参考文献:

- [1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等.新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):1-8.
 SHU Yinbiao,ZHANG Zhigang,GUO Jianbo,et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(1):1-8.
- [2] 蒲天骄,陈乃仕,王晓辉,等. 主动配电网多源协同优化调度架构 分析及应用设计[J]. 电力系统自动化,2016,40(1):17-23.
 PU Tianjiao,CHEN Naishi,WANG Xiaohui, et al. Application and architecture of multi-source coordinated optimal dispatch for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(1):17-23.
- [3] 任杰桢, 鞠平, 赵娟,等. 考虑电动机负荷的静态电压稳定分析
 [J]. 电力自动化设备,2014,34(5):139-143.
 REN Jiezhen, JU Ping, ZHAO Juan, et al. Static voltage stability analysis considering motor loads [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5):139-143.
- [4] 谢应昭,卢继平. 基于多项式正态变换和最大熵估计的含风电系

统电压稳定概率分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):66-73. XIE Yingzhao,LU Jiping. Probabilistic voltage stability analysis based on polynomial normal transformation and maximum entropy estimation for power system containing wind power [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(10):66-73.

- [5] 鲍海波,韦化,郭小璇.考虑双馈异步风电机组无功极限的静态 电压稳定概率评估[J].电力自动化设备,2016,36(11):87-93.
 BAO Haibo,WEI Hua,GUO Xiaoxuan. Static voltage stability probabilistic evaluation considering reactive power limit of DFIG
 [J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(11):87-93.
- [6] 陈磊, 闵勇, 侯凯元. 考虑风电随机性的静态电压稳定概率评估 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3):674-680. CHEN Lei, MIN Yong, HOU Kaivuan. Probabilistic steady-state

voltage stability assessment considering stochastic wind power [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(3):674-680.

[7] 方斯顿,程浩忠,徐国栋,等. 随机最优潮流及其应用的研究综述
 [J]. 电力自动化设备,2016,36(11):1-10.
 FANG Sidun,CHENG Haozhong,XU Guodong,et al. Reviews on stochastic optimal power flow and its application[J]. Electric Power

 Automation Equipment,2016,36(11):1-10.

 [8] 易驰韡,胡泽春,宋永华.考虑注入功率分布的随机最优潮流方

法[J]. 电网技术,2013,37(2):367-371. YI Chiwei,HU Zechun,SONG Yonghua. A stochastic optimal

power flow method considering power injection distributions [J]. Power System Technology, 2013, 37(2):367-371.

- [9] LOPEZ J C, MUNOZ J I, CONTRERAS J, et al. Optimal reactive power dispatch using stochastic chance-constrained programming [C] // Transmission and Distribution:Latin America Conference and Exposition. Montevideo, Uruguay: IEEE, 2012:1-7.
- [10] 马瑞,金艳,刘鸣春. 基于机会约束规划的主动配电网分布式风光双层优化配置[J]. 电工技术学报,2016,31(3):145-154.
 MA Rui,JIN Yan,LIU Mingchun. Bi-level optimal configuration of distributed wind and photovoltaic generations in active distribution network based on chance constrained programming [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(3):
- [11] 黄煜,徐青山,卞海红,等. 基于拉丁超立方采样技术的半不变 量法随机潮流计算[J]. 电力自动化设备,2016,36(11):112-119.
 HUANG Yu,XU Qingshan,BIAN Haihong,et al. Cumulant method based on Latin hypercube sampling for calculating probabilistic power flow[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(11):112-119.

145-154

- [12] 蒋程,王硕,王宝庆,等. 基于拉丁超立方采样的含风电电力系统的概率可靠性评估[J]. 电工技术学报,2016,31(10):193-206.
 JIANG Cheng, WANG Shuo, WANG Baoqing, et al. Probabilistic reliability assessment of power system containing wind power based on Latin hypercube sampling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(10):193-206.
- [13] 孙国强,卫志农,唐利锋,等. 多目标配电网故障定位的 Pareto 进化算法[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):57-61.
 SUN Guoqiang,WEI Zhinong,TANG Lifeng, et al. Pareto evolutionary algorithm for multi-objective fault location of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2012, 32(5):57-61.

- [14] MAZHARI S M, MONSEF H, ROMERO R. A multi-objective distribution system expansion planning incorporating customer choices on reliability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015,31(2):1-11.
- [15] PATERAKIS N G,MAZZA A,SANTOS S F,et al. Multi-objective reconfiguration of radial distribution systems using reliability indices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016,31 (2):1048-1062.
- [16] CHANG Y C. Multi-objective optimal SVC installation for power system loading margin improvement [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2):984-992.
- [17] 赵建伟,李禹鹏,杨增辉,等.基于拟蒙特卡罗模拟和核密度估计的概率静态电压稳定计算方法[J].电网技术,2016,40(12): 3833-3839.

ZHAO Jianwei,LI Yupeng,YANG Zenghui,et al. Probabilistic static voltage stability calculation based on qusi-Monte Carlo and kernel density estimation [J]. Power System Technology, 2016,40(12):3833-3839.

- [18] 刘林,王锡凡,丁晓莺. 基于填充函数方法的最小静态负荷裕度 计算[J]. 电力系统自动化,2010,34(6):26-31.
 LIU Lin,WANG Xifan,DING Xiaoying. A novel filled function based closest static load margin computation method[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(6):26-31.
- [19] 刘宝碇,赵瑞清,王纲. 不确定规划及应用[M]. 北京:清华大学 出版社,2003:82-84.
- [20] HU Z, WANG X, TAYLOR G. Stochastic optimal reactive power dispatch : formulation and solution method [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2010, 32(6):615-621.
- [21] 刘学,李晖,周明,等.考虑风速相关性的多目标电网规划[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):87-94.
 LIU Xue,LI Hui,ZHOU Ming,et al. Multiple-objective power grid planning considering wind speed correlation[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(10):87-94.
- [22] 朱志键,王杰. 基于改进 NSGA-Ⅱ的电力系统动态环境经济调度[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):176-183.

ZHU Zhijian, WANG Jie. Dynamic economic emission dispatch based on modified NSGA-II for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2):176-183.

作者简介:



谢仕炜(1993—),男,福建泉州人,博士 研究生,主要研究方向为电网规划与优化 (**E-mail**:994927636@qq.com);

胡志坚(1969—),男,湖北荆州人,教 授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研 究方向为电力系统稳定分析与控制、新能源接 入与分布式电力系统(E-mail:zhijian_hu@ 163.com);

644 I - 2 Ir

宁 月(1995—),女,湖北孝感人,硕士研究生,主要方 向为电力系统稳定分析与控制(E-mail:972737548@qq.com)。 (下转第51页 continued on page 51)

Ð

- [15] 刘宝碇,赵瑞清,王纲. 不确定规划及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2003:23-31,79-112.
- [16] 杨宏,苑津莎,张铁峰.一种基于 Beta 分布的风电功率预测误 差最小概率区间的模型和算法[J].中国电机工程学报,2015, 35(9):2135-2142.

YANG Hong, YUAN Jinsha, ZHANG Tiefeng. A model and algorithm for minimum probability interval of wind power forecast errors based on Beta distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2135-2142.

作者简介:



徐熙林(1994—),男,辽宁鞍山人,硕士 研究生,主要研究方向为电力市场与电力系 统优化运行(**E-mail**:xuxilin@yeah.net); 宋依群(1970—),女,浙江宁波人,副教

授,博士,主要研究方向为电力市场及电力 系统分析(E-mail:yqsong@sjtu.edu.cn)。

徐熙林

Power-output allocation for peak regulation of regional grid with high penetration of renewable energy resources

XU Xilin¹, SONG Yiqun¹, YAO Liangzhong², YAN Zheng¹

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education,

Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: With the large-scale integration of renewable energy resources, peak regulation during valley-load period becomes an operational difficulty of regional grid with high penetration of renewable energy resources. Power-output allocation among the generators directly-dispatched by the regional grid can relieve the peak regulation pressure of provincial grids. A quadratic programming model with the load stability of provincial grids and the maximum profit of directly-dispatched regional generators as its objectives is built and the price leverage and peak regulation pressure coefficient are introduced to coordinate the peak regulation demands of different provincial grids, based on which, a chance-constrained programming model considering the wind-power uncertainty is built and solved by the Monte Carlo simulation technology to verify the effectiveness of the proposed power-output allocation model in the conditions of uncertainty and risk. The simulative results of a simplified example of East China Power Grid show that, the proposed model can effectively solve the peak regulation difficulty of regional grid with high penetration of renewable energy resources.

Key words: peak regulation; power-output allocation; high penetration of renewable energy resources; chance-constrained programming; Monte Carlo methods

(上接第 42 页 continued from page 42)

Multi-objective hierarchical stochastic chance-constrained programming considering optimal load-shedding direction

XIE Shiwei, HU Zhijian, NING Yue

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A multi-objective hierarchical stochastic programming model with chance constraints is proposed, which takes the optimal shedding load and the optimistic voltage-stability margin as the upper-level objectives and the network loss expectation as the lower-level objective. The minimum static voltage-stability margin is calculated in the most dangerous load growth mode. A method is proposed to calculate the optimal load shedding direction, which is taken as a constraint. The non-dominated sorting genetic algorithm combined with Latin hypercube sampling-based Monte Carlo simulation is applied to solve the proposed model. The simulative results of IEEE 39-bus system show that, with ensured economy, the proposed method can improve the network security and voltage stability margin effectively.

Key words: optimal load-shedding direction; multi-objective hierarchical programming; chance constrained programming; stochastic simulation; voltage stability; optimization