

相关机会二层规划法在输电网扩展规划中的应用

范宏¹,程浩忠²,唐永红³,徐琳³

(1. 上海电力学院 电气及自动化工程学院,上海 200090;2. 上海交通大学 电气系,上海 200240;
3. 四川电力科学研究院,四川 成都 610072)

摘要: 建立输电网扩展规划的相关机会二层规划模型。该模型有 2 层规划问题,上层规划问题以输电投资回报率大于某一实现水平的概率最大化为目标;下层规划包含系统正常运行下的社会利益最大化与系统 $N-1$ 运行时的系统切负荷量小于给定值的概率最大化 2 个子规划问题。利用 Monte-Carlo 法模拟不确定性参数,采用遗传算法进行全局寻优,下层规划利用内点法进行计算。修改的 18 节点系统验证了所提模型和方法的有效性。

关键词: 电力系统; 输电网规划; 相关机会规划; 二层规划; 模型

中图分类号: TM 715

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.011

0 引言

传统的输电网扩展规划是根据规划期的负荷预测及确定的电源规划方案来寻求最优的输电网规划方案,使输电网的投资成本及运行成本最小^[1-2];传统规划模型通常采用确定性规划模型,一般不会考虑规划问题中不确定性因素的影响,而在实际的输电网规划中会存在多种不确定性因素,如负荷、电源等。因此,实际的输电网扩展规划问题是不确定性规划问题,从数学模型来看应该是一个非常复杂的动态多目标不确定性混合整数非线性规划模型,这种模型特别复杂,求解难度也较大,传统规划方法难以对其进行准确描述和求解^[3]。

为了弥补传统规划方法的不足,考虑不确定性因素的灵活电网规划方法日益受到国内外研究人员的广泛关注,不确定性规划理论被不断应用到输电网规划研究领域。文献[4]考虑多场景技术的输电网规划,以牺牲经济性为代价来提高规划方案对未来各种场景的适应性。文献[5]考虑了市场环境下发电出力和负荷的不确定性因素,根据线路概率性 $N-1$ 准则建立了输电网灵活规划模型,得到兼顾经济性和安全性且投资风险最小的规划方案。文献[6]引入了集对分析理论,建立了基于集对分析和体现多目标的柔性电网规划模型,以允许 $N-1$ 运行时少量过负荷来提高规划网架的经济性。文献[7]提出基于联系系数模型的电网灵活规划模型,用联系系数描述不确定性信息,构造了电网规划的确定与不确定系统。文献[8]提出了考虑风电场的输电网规划方法,利

用概率密度函数模拟风电场出力,提出了以考虑成本和盈利的线路有效性指标进行电网扩展的启发式规划方法。

在不确定性规划理论中,1997 年刘宝碇教授提出一种新的随机规划方法——相关机会规划方法^[9-10],其主要思想是在不确定环境下最大化随机事件成立的机会从而给出最优决策。该方法打破了可行集的概念,直接进入不确定环境,是使事件的机会函数在不确定环境下达到最优的一种优化理论。这种规划方法从本质上与确定性规划方法、期望值规划方法、机会约束规划方法截然不同。

本文基于二层规划理论,分析了相关机会二层规划模型的特点,并结合了输电网规划问题,将其应用到了输电网规划建模中,建立了输电网规划的相关机会二层规划模型并进行求解。该模型的目标是寻求一个最优输电网规划网架,使其能在不确定环境下具有较高投资回报率,并具有较大的实现概率。

1 相关机会二层规划

相关机会二层规划模型是从机会目标角度,通过最大化目标函数的实现概率给出最优决策。其模型如下:

$$\max P_r\{F(\mathbf{x},\xi) \geq \bar{F}\} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } G(\mathbf{x},\xi) \leq 0 \quad (2)$$

$$\max P_r\{f(\mathbf{x},\mathbf{y},\xi) \geq \bar{f}\} \quad (3)$$

$$\text{s.t. } g(\mathbf{x},\mathbf{y},\xi) \leq 0 \quad (4)$$

其中, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{n_1}$ 为上层决策向量,是 n_1 维实数向量; $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^{n_2}$ 为下层决策向量,是 n_2 维实数向量; $\xi \in \mathbf{R}^n$ 为随机向量,是 n 维实数向量; $P_r\{\cdot\}$ 为概率函数。式(1)为上层机会目标,式(2)为上层约束条件,式(3)为下层机会目标,式(4)为下层约束条件。

收稿日期:2012-10-23;修回日期:2013-09-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307104)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307104)

2 输电网规划模型

2.1 规划模型

将相关机会二层规划应用到输电网规划问题中可得到输电网规划模型如下。

上层目标:

$$\max f_1(\mathbf{x}) = P_r \{F \geq R\} + a f_2 \quad (5)$$

$$F = (T_R(t_y) - I_{C,T}(t_y)) / I_{C,T}(t_y) \quad (6)$$

$$I_{C,T}(t_y) = \sum_{l \in \Omega_{AL}} c_l Z_l \frac{\lambda(1+\lambda)^{n_T}}{(1+\lambda)^{n_T} - 1} \quad (7)$$

其中, F 为输电网投资回报率; R 为某一理想值, 以下称为实现水平; λ 为资金的年利率; t_y 为某一年时间; $T_R(t_y)$ 为输电网年运行利益; c_l 为待架线路 l 的投资单价; Z_l 为待架线路 l 的架设条数; n_T 为投资回收期; Ω_{AL} 为待架线路集合; $I_{C,T}(t_y)$ 为输电网年投资成本; a 为下层第 2 个子问题的目标函数值加入到上层目标函数的系数, 下层目标函数值加到上层目标函数作为上层目标函数的一部分, 实现上下层相互作用。

上层约束条件:

$$\text{s.t. } 0 \leq Z_l \leq \bar{Z}_l \quad (8)$$

其中, \bar{Z}_l 为待架线路 l 的最大架设条数。

下层规划包含 2 个子问题: 第 1 个子问题是实现系统在正常运行下的社会利益最大化模型, 得到系统正常运行下的输电利益; 第 2 个子问题是实现系统在 $N-1$ 运行下的系统切负荷总量小于某一给定值的实现概率最大化。这 2 个问题运行条件不同, 故可视为 2 个独立问题处理。

a. 下层第 1 个子问题。

第 1 个子问题的目标:

$$\max f_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}_1) = \sum_{j \in \Omega_b} B_j(t_h) - \sum_{i \in \Omega_g} C_i(t_h) \quad (9)$$

其中, t_h 为某一小时时间; $B_j(t_h)$ 为负荷 j 在 t_h 时间内的供电收益; $C_i(t_h)$ 为发电厂 i 在 t_h 时间内的运行成本; Ω_g 为发电节点集合; Ω_b 为负荷节点集合。

式(9)为下层第 1 个子问题的目标函数, 即社会利益最大化目标, 控制变量包含上层决策变量和第 1 个子问题的发电出力、负荷量、节点电压、节点相角。

第 1 个子问题的约束条件:

$$\text{s.t. } 0 \leq P_{g_i}(t_h) \leq \bar{P}_{g_i} \quad (10)$$

$$0 \leq P_{d_j}(t_h) \leq \bar{P}_{d_j} \quad (11)$$

$$\sum_{i \in \Omega_g} P_{g_i}(t_h) - \sum_{j \in \Omega_b} P_{d_j}(t_h) = 0 \quad (12)$$

$$|P_l(t_h)| \leq \bar{P}_l \quad (13)$$

$$T_{RC}(t_h) \leq \omega T_{RS}(t_h) \quad (14)$$

其中, $P_{g_i}(t_h)$ 为发电节点 i 的有功出力, \bar{P}_{g_i} 为发电节点 i 的最大有功出力, $P_{d_j}(t_h)$ 为负荷节点 j 的有功负荷, \bar{P}_{d_j} 为负荷节点 j 的最大负荷, $P_l(t_h)$ 为线路 l 的有功潮流, \bar{P}_l 为线路 l 的最大有功潮流, $T_{RS}(t_h)$ 为输电

服务收益, $T_{RC}(t_h)$ 为输电阻塞收益, ω 为给定的比例系数。式(10)为节点 i 发电机有功出力的约束, 式(11)为负荷节点 j 有功负荷约束, 式(12)为功率平衡等式约束, 式(13)为线路 l 的有功潮流约束, 式(14)为输电阻塞约束。

b. 下层第 2 个子问题。

第 2 个子问题的目标:

$$\max f_2(\mathbf{x}, \mathbf{y}_2) = P_r \left\{ \sum_{j \in \Omega_b} P_{d_j}^p(t_h) \leq \bar{P}_r \right\} \quad (15)$$

其中, \bar{P}_r 为系统 $N-1$ 运行下的最大的切负荷量总和的设定值, $P_{d_j}^p(t_h)$ 为系统 $N-1$ 运行下负荷 j 在 t_h 时间内的切负荷量。式(15)即表示系统切负荷量小于某一理想值的实现概率最大。

第 2 个子问题的约束条件:

$$\text{s.t. } 0 \leq P_{g_i}^p(t_h) \leq \bar{P}_{g_i} \quad (16)$$

$$0 \leq P_{d_j}^p(t_h) \leq \bar{P}_{d_j} \quad (17)$$

$$\mathbf{B}^p(t_h) \boldsymbol{\theta}^p(t_h) = \mathbf{P}_{g_i}^p(t_h) - \mathbf{P}_{d_j}^p(t_h) + \mathbf{P}_l^p(t_h) \quad (18)$$

$$0 \leq |P_l^p(t_h)| \leq \bar{P}_l \quad (19)$$

其中, $P_{g_i}^p(t_h)$ 为系统 $N-1$ 运行下发电节点 i 的有功出力, $P_{d_j}^p(t_h)$ 为系统 $N-1$ 运行下负荷节点 j 的切负荷量, $P_l^p(t_h)$ 为系统 $N-1$ 运行下线路 l 的有功潮流, $\mathbf{B}^p(t_h)$ 为系统 $N-1$ 运行下系统的电纳矩阵, $\boldsymbol{\theta}^p(t_h)$ 为系统 $N-1$ 运行下系统节点相角向量。式(16)~(19)考虑系统 $N-1$ 运行条件, 式(16)为发电节点 i 有功出力约束, 式(17)为负荷节点 j 有功负荷约束, 式(18)为潮流等式约束, 式(19)为线路 l 的有功潮流约束。

在上述模型中, 由第 1 个子问题计算得到 $T_R(t_y)$ 与由第 2 个子问题计算得到系统切负荷量小于某一理想值的实现概率反馈到上层目标函数; 而上层规划确定的输电网规划网架直接影响 2 个子问题的目标函数, 从而实现上下层规划的相互作用。

2.2 不确定性因素的模拟与场景模拟

a. 线路造价模拟。

在规划期内, 设线路造价围绕其成本价值在一定范围内上下波动, 且服从一定区间内的均匀分布, 设线路造价为 C_i , 服从均匀分布 $C_i \in U[C_i^{\min}, C_i^{\max}]$ 。

b. 新增电源点电源容量。

本文对新建电厂的位置、容量采用离散概率分布函数进行模拟。

$$P_r(P_{g_k} = g_k) = p_k \quad k = 1, \dots, n_G \quad (20)$$

$$0 < p_k < 1, \quad \sum_{k=1}^{n_G} p_k = 1 \quad (21)$$

其中, n_G 为新增电源点的个数。式(20)表示电源点 i 的有功出力 P_{g_i} 等于有功功率 g_k 的概率为 p_k 。

c. 新增负荷点的负荷值。

若负荷节点 j 原有负荷为 $P_{d_{j0}}$, 则该点负荷的变化量 ΔP_{d_j} 为一随机变量, 假设服从正态分布 $\Delta P_{d_j} \sim N(\mu_{d_j}, \sigma_{d_j}^2)$, 因此该点负荷 P_{d_j} 为:

$$P_{\psi} = P_{\psi_0} + \Delta P_{\psi} \quad (22)$$

若负荷节点 j 为新增的负荷节点,则取 $P_{\psi_0} = 0$, $P_{\psi} = \Delta P_{\psi}$ 。

d. 场景模拟。

在场景模拟中考虑以下 4 种场景。

场景 1: 假设新建电源点的容量满足式(20)、(21)的离散概率分布,新增负荷点的负荷满足式(22)的正态分布。

场景 2: 在上述随机模拟基础上,考虑部分新建电源点为最大出力符合正态分布函数 $P_{\text{max}} \sim N(\mu, \delta)$ 的情况。

场景 3: 在场景 2 基础上考虑负荷节点最大负荷减小为原来的 90%。

场景 4: 在场景 2 基础上考虑负荷节点最大负荷增长为原来的 1.1 倍。

3 规划模型的求解方法

3.1 上层目标函数概率的计算

模型上层目标中概率计算方法如下所示:

$$U_1 = P_r \{F \geq R\} \quad (23)$$

计算不确定函数 U_1 的步骤如下。

a. 给定输电网规划方案,计算输电网的年投资成本 $I_{c,r}(t_y)$ 。

b. 置计算器 $s = 0$ 。

c. 随机产生 M 组新增负荷场景,为一随机矢量序列 $\xi_1 = \{\varepsilon(1), \dots, \varepsilon(M)\}$ 。

d. 按照步骤 c 的负荷场景,产生 M 组新增电源点建设方案 $\xi_2 = \{\varepsilon(M+1), \dots, \varepsilon(2M)\}$ 。

e. 按照 M 组场景,产生 M 组线路造价 $\xi_3 = \{\varepsilon(2M+1), \dots, \varepsilon(3M)\}$ 。

f. 计算下层第 1 个子规划问题,并计算年输电利益 $T_r(t_y)$,得到输电网规划方案的投资回报率序列 $\{F(1), \dots, F(M)\}$ 。

g. 判断 $F > R$ 是否成立,成立则计数器 $s = s + 1$; 否则,继续后面步骤。

h. 返回 s/M 即得到概率 $P_r \{F \geq R\}$ 。

3.2 下层目标函数概率的计算

下层随机函数概率计算方法如下所示:

$$U_2 = P_r \left\{ \sum_{j \in \Omega_h} P_{\psi_j}^p(t_h) \leq \bar{P}_r \right\} \quad (24)$$

计算不确定函数 U_2 的步骤如下。

a. 给定输电网规划方案。

b. 置计算器 $s = 0$ 。

c. 随机产生 M 组新增负荷场景,为一随机矢量序列 $\xi_1 = \{\varepsilon(1), \dots, \varepsilon(M)\}$ 。

d. 按照步骤 c 的负荷场景,产生 M 组新增电源点建设方案 $\xi_2 = \{\varepsilon(M+1), \dots, \varepsilon(2M)\}$ 。

e. 按照 M 组负荷场景,对应产生 M 组线路造价 $\xi_3 = \{\varepsilon(2M+1), \dots, \varepsilon(3M)\}$ 。

f. 采用随机模拟计算系统在各场景 $N-1$ 运行下的各节点切负荷量和系统切负荷总量。

g. 假设系统在 $N-1$ 运行下的系统切负荷总量 $\sum_{j \in \Omega_h} P_{\psi_j}^p(t_h) \leq \bar{P}_r$ 成立,则计数器 $s = s + 1$; 否则,继续后面步骤。

h. 返回 s/M 即得到所求概率。

3.3 下层子问题的计算

本文模型下层规划存在 2 个子问题,由于第 1 个子问题的决策变量为系统正常运行下的发电节点出力和节点负荷量;而第 2 个子问题是系统在 $N-1$ 运行下的发电节点出力和节点切负荷量,各个变量相互独立。下层子问题计算步骤如下:

a. 给定上层规划的网架结构;

b. 利用原始-对偶内点法求解第 1 个子问题,得到各节点有功出力,计算各种随机场景下系统运行时的输电服务收益和阻塞收益,得到输电电网公司的输电利益;

c. 利用原始-对偶内点法求解第 2 个子问题,得到各随机场景下系统在 $N-1$ 运行下的切负荷量;

d. 计算第 2 个子问题的系统切负荷量小于给定值的实现概率,得到第 2 个子问题的目标值。

3.4 个体目标值的计算

本文对上层目标中预先给定的投资回报率实现水平 R 采用自适应增加的方式。计算每个规划个体的个体目标值方法如下:

a. 给定上层规划的网架结构;

b. 计算下层规划的第 1 个子问题,得到各随机场景系统正常运行下的节点有功出力,计算各场景下的该规划方案的投资回报率,预先给定一个较小值为 R ,计算概率 $P_r \{F \geq R\}$;

c. 计算下层规划的第 2 个子问题,得到各随机场景下的系统 $N-1$ 运行时的切负荷量总和,比较给定的切负荷量 \bar{P}_r ,计算概率 $P_r \{f \leq \bar{P}_r\}$;

d. 判断 $P_r \{F \geq R\}$ 是否为 1,若是,则自适应调节 R ,对已得到实现水平序列选取中间值的方法来重新设置投资回报率实现水平,重新计算 $P_r \{F \geq R\}$,同时计算个体目标值。

本文采用文献[11]的混合算法,即遗传算法^[12]和原始-对偶内点法相结合的混合算法对所提模型进行求解。

4 算例分析

为了验证本文所提方法的有效性,采用 18 节点系统进行计算分析。相关数据参考文献[1],模型中

给定的切负荷量上限值 $\bar{P}_i=100$ W。假设新建输电网架最大运行年限为 20 a, 由此计算得到等年值系数为 0.1175。年最大负荷持续小时数为 3500 h。将本文提出的相关机会二层规划模型与文献[11]提出的确定性规划方法进行比较, 所得 2 种规划方案如图 1 所示。

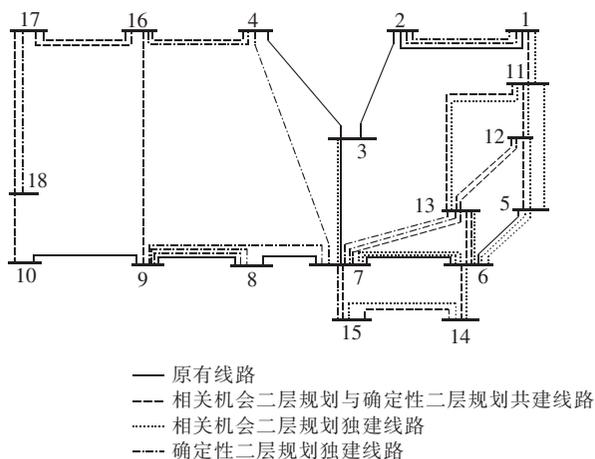


图 1 18 节点系统 2 种优化网架比较

Fig.1 Comparison between two optimized networks of 18-bus system

由图 1 可知, 相关机会二层规划方案比确定性规划方案多增加了 1-11、3-7、5-6(2 条)、5-11、5-12、6-7(2 条)、6-13、6-14、11-12、11-13、14-15; 少增加了 1-2(2 条)、4-7、4-16、7-9、7-13(2 条)、7-15、8-9(2 条)、17-18。相关机会二层规划方案架线总数为 31 条, 而确定性规划方案架线总数 30 条。

本文计算了确定性规划方案在多随机场景下的投资回报率实现水平和实现概率及系统切负荷量约束的实现水平和实现概率, 比较 2 种规划方案的年投资成本与年投资回报率, 如表 1 所示。

表 1 18 节点系统 2 种方法的比较
Tab.1 Comparison between two planning methods for 18-bus system

可比项目	相关机会二层规划方案	确定性规划方案
静态投资总成本/万元	291400	286200
年投资成本/万元	34228	33617
年输电利益/万元	39362	42970
年投资回报率/%	15	28
回报率实现概率/%	100	10

a. 年投资成本问题。

由表 1 可见, 本文模型方案的年投资成本比确定性规划方案的年投资成本大, 这是由于确定性规划方案只考虑某一确定场景而做出规划决策; 本文模型考虑了不确定性因素, 并模拟了多种不同种类的随机场景, 因此所得规划方案对未来环境的适应性较好, 但这也增大了规划方案的投资成本。

b. 投资回报率问题。

由表 1 可见, 本文模型方案由于年投资成本较确定性规划方案大而在年输电利益上又相对较小, 所以本文模型方案的投资回报率比确定性规划方案的投资回报率小。

c. 投资回报率实现的概率问题。

由于本文规划方法以投资回报率大于实现水平的实现概率最大化为上层目标, 既强调高投资回报率, 又强调在该投资回报率下的高实现概率。规划方案虽然投资回报率比确定性规划方案小, 但在不确定性场景下实现的概率可达到 100%, 因此投资风险性很小, 这更符合输电投资者的投资心理。虽然确定性规划方案投资回报率较高, 但在不确定性场景下, 确定性规划方案投资回报率的实现概率很小, 规划方案具有小投资、高风险的特性。

5 结语

本文将相关机会二层规划法应用到了输电网规划问题中, 成功实现了输电网规划的建模与求解。经过算例分析可知, 本文所提方法能根据输电投资者的心理和需求进行建模, 并能仿真模拟多种随机场景发生的情况, 所得方案与确定性规划方案相比具有更好的灵活性和适应性, 可以为投资决策者提供切合实际的决策依据。

在建模中, 本文只采用了随机函数模拟不确定性参数的建模方法, 在未来研究中可根据不确定性参数特点, 进一步考虑模糊数、灰数等实现方法; 此外, 对于所提模型的设计与实现方法仍需要进行改进, 为更好解决输电网规划问题提供指导。

参考文献:

- [1] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [2] 范宏, 金义雄, 程浩忠, 等. 兼顾输电利润和社会成本的输电网二层规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 106-111.
FAN Hong, JIN Yixiong, CHENG Haozhong, et al. Transmission network planning considering transmission profit and social cost based on bi-level programming[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 106-111.
- [3] GORENSTIN B G, CAMPODONICO N M, COSTA J P, et al. Power system expansion planning under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1): 129-136.
- [4] 高赐威, 程浩忠, 王旭. 考虑场景发生概率的柔性约束电网规划模型[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 34-38.
GAO Ciwei, CHENG Haozhong, WANG Xu. Electric power network flexible planning model based on the probability of scene occurrence[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 34-38.
- [5] 金华征, 程浩忠, 曾德君, 等. 基于集对分析的柔性电网规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 7-12.
JIN Huazheng, CHENG Haozhong, ZENG Dejun, et al. A novel method of flexible transmission network planning based on set

- pair analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(3):7-12.
- [6] 金华征,程浩忠,杨晓梅,等. 基于联系数模型的电网灵活规划方法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(12):16-20.
JIN Huazheng,CHENG Haozhong,YANG Xiaomei,et al. Transmission network flexible planning based on connection number model[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(12):16-20.
- [7] 郑连清,王腾,娄洪立,等. 基于模糊机会约束规划的电力系统规划方法[J]. 高电压技术,2007,33(3):67-70.
ZHENG Lianqing,WANG Teng,LOU Hongli,et al. Transmission expansion planning based on fuzzy chance constrained programming[J]. High Voltage Engineering,2007,33(3):67-70.
- [8] 张新松,袁越,吴博文,等. 电力市场环境含大规模风电场的输电网规划[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):100-103.
ZHANG Xinsong,YUAN Yue,WU Bowen,et al. Expansion planning of transmission network with large wind farm in deregulated electricity market environment[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(4):100-103.
- [9] 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.
- [10] 刘宝碇,彭锦. 不确定理论教程[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [11] FAN Hong,CHENG Haozhong. Transmission network expansion planning with security constraints based on bi-level linear programming[J]. European Transactions on Electrical Power,2009,19(3):388-399.
- [12] EMANUELE D,NUNZIO S. A self-adaptive niching genetic algorithm for multimodal optimization of electromagnetic devices [J]. IEEE Trans on Power Systems,2006,42(4):1203-1206.

作者简介:

范 宏(1978-),女,湖北恩施人,博士,从事电力系统规划、电力系统运行方面的研究(E-mail:fan_honghong@126.com);

程浩忠(1962-),男,浙江东阳人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力系统规划、分析及电压稳定等方面的研究工作。

Application of dependent-chance bilevel programming in transmission network expansion planning

FAN Hong¹,CHENG Haozhong²,TANG Yonghong³,XU Lin³

(1. Department of Electrical Engineering,Shanghai University of Electric Power,Shanghai 200090,China;

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

3. Sichuan Electric Power Science Research Institute,Chengdu 610072,China)

Abstract: A model of transmission network expansion planning based on dependent-chance bilevel programming is proposed. It takes the maximum probability of investment return rate larger than a given value as its objective in its upper level programming. There are two appurtenant objectives in its lower level programming:the maximum social profit in normal operation and the maximum probability of load shedding lower than a given value in $N-1$ operation. Monte-Carlo method is adopted to simulate the uncertainty of model parameters and the genetic algorithm is used to globally search the optimal solution. The interior point method is used in the lower level programming. A modified 18-bus system is applied to verify the effectiveness of the proposed model and method.

Key words: electric power systems; transmission network planning; dependent-chance programming; bilevel programming; models

(上接第 58 页 continued from page 58)

Improved artificial fish swarm algorithm for parameter identification of hydroelectric turbine-conduit system

LIU Changyu¹,HE Xuesong¹,LI Chongwei¹,WANG Zhan²,ZHANG Enbo²,YAN Qiurong³

(1. School of Hydropower and Information Engineering,Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China;2. Northeast China Electric Power Research Institute,Shenyang 110006,China;

3. College of Electrical and Electronic Engineering,Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China)

Abstract: An improved artificial fish swarm algorithm combined with ant colony optimization is presented for the parameter identification of hydroelectric turbine-conduit system,which applies the artificial fish swarm algorithm to globally explore the search space in each iteration cycle and then employs the ant colony optimization to locally search the domain with the currently best solution. Based on the data measured on site,it identifies the parameters of hydroelectric turbine-conduit model by minimizing the object function. The modeling results based on site data show that,compared with the traditional identification methods,the proposed algorithm has better global optimization ability and robustness.

Key words: hydroelectric turbines; conduit; parameter identification; artificial fish swarm algorithm; ant colony optimization algorithm; model buildings; computer simulation