

基于两阶段双层多目标粒子群优化算法的 输变电工程立项决策

徐凯¹, 陈宏伟², 孙可³, 江全元¹, 丁晓宇², 郑朝明³

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省电力设计院, 浙江 杭州 310012;

3. 国家电网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 建立输变电工程两阶段多目标决策评价模型, 该模型包括立项和决策 2 个阶段, 以及电网的安全性、经济性、环境友好性、适应性和协调性 5 个指标; 提出双层多目标粒子群优化算法, 求解模型的 Pareto 最优解, 最后用综合评价方法选出最优实施方案。算例分析结果验证所提模型的正确性和有效性。

关键词: 输变电工程; 决策; 模型; 双层多目标粒子群优化; 优化; 综合评价

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.09.019

0 引言

随着我国经济的高速发展和电力系统的不断扩大, 人们对供电的安全性、可靠性等方面的要求也日益增长, 势必需要大量的输变电工程投入到电网建设中。为应对建设需求, 每年都会有大量的输变电工程上报。在这些工程中, 一部分是电网建设需要的, 但另有一部分也是没有必要的, 或者上报的方案不是最优的, 需要被替换成更好的实施方案。如何在大量的工程中选择需要的并且以一种最好的方案进行实施, 对于电网建设决策者而言至关重要。

输变电工程立项决策模型的基本任务是根据对电网的全面评价, 确定上报申请的待选项目是否有必要立项。如果确定立项, 则合理地决策用哪一种方案进行针对性地改造和建设, 从而使规划方案能满足电网安全可靠运行的要求, 适应电力发展的需求, 同时使能源资源得到合理的优化配置。

输变电工程立项决策问题是一个非线性、多阶段、多目标的复杂优化问题。它有 3 个方面的关键技术难点: 需要一套科学、客观、合理以及全面的评价指标体系去建立该数学模型; 输变电工程立项决策模型往往建立一个多目标优化模型, 需要寻找一种高效的多目标优化算法进行求解; 在利用多目标优化算法求得 Pareto 最优解后, 应用一种有效的综合评价方法比选备选决策也是一个重要的环节。

对于在输变电工程立项决策问题中的难点, 目前大部分文献集中在对于可选的电网规划方案, 用一些评价指标对各个方案进行评价后得到一个最终方案^[1-3], 但采用多指标全方位地对电网进行综合评

价并将其转化为多目标优化模型的文献并不多见。

对于多目标优化问题, 多目标遗传算法^[4-5]最先被提出, 且很多学者专家对其进行了大量的改进^[6-7]。鉴于粒子群优化算法参数简单, 并且无需复杂调整的特点, 在多目标遗传算法的基础上, 文献^[8]首先提出了多目标粒子群优化(MOPSO)算法。为了更好地保持多样性, 文献^[9]提出了基于小生境的多目标粒子群优化算法, 文献^[10]提出了基于自适应划分的多目标粒子群优化算法, 进一步优化了多目标粒子群优化算法。但输变电工程立项决策问题指标众多, 普通的多目标优化算法很难求解这样一个高维的问题。

在评价方法方面, 已有文献提出了利用多目标模糊评价方法^[1]、基于区间层次分析法^[2]、基于熵权灰色法^[3]和独立信息数据波动赋权(DIDF)法^[11]等优度评价法, 对电网规划方案进行评价。但这些文献在指标选取上没有一个统一的标准, 而且其中有些指标意义不大或者在实际电网中难以获得原始数据。

因此, 本文基于一个较为完整的输变电工程立项决策方案评价指标体系, 包括电网的安全性、经济性、环境友好性、适应性和协调性 5 个方面, 形成一个输变电工程立项决策的多目标优化问题, 并针对部分指标需要优先满足的要求, 提出自动寻优的两阶段双层粒子群优化算法, 有效地求解各个方案的评价指标, 形成 Pareto 最优解, 最后用综合评价方法进行比选决策, 选取最优方案。

1 输变电工程立项决策数学模型

多目标优化问题的数学模型一般可以表示为式(1)的形式。

$$\begin{cases} \min \mathbf{y} = \mathbf{F}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x}))^T \\ \text{s.t. } h_i(\mathbf{x}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, s \\ g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (1)$$

其中, n 为决策变量的个数, m 为目标变量个数, n 维的决策变量 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, m 维的目标函数矢量 $\mathbf{y} =$

收稿日期: 2013-12-24; 修回日期: 2014-07-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51137003); 教育部博士点基金资助项目(20120101110081)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51137003) and the Doctoral Fund of Ministry of Education of China(20120101110081)

$(y_1, y_2, \dots, y_m); h_i(\mathbf{x})$ 为等式约束; $g_j(\mathbf{x})$ 为不等式约束。

定义 1: 假设多目标优化问题的 2 个解向量 U 、 $V \in \mathbf{R}^D$, 若满足

$$\begin{cases} f_i(U) \leq f_i(V) & \forall i \in \{1, 2, \dots, m\} \\ f_i(U) < f_i(V) & \exists i \in \{1, 2, \dots, m\} \end{cases} \quad (2)$$

则称 U 相比 V 是 Pareto 占优, 也称 U 支配 V 。

定义 2: 假设 $\mathbf{x}^* \in \mathbf{R}^D$, 当且仅当 \mathbf{R}^D 中不存在支配 \mathbf{x}^* 的 \mathbf{x} 时, 则称 \mathbf{x}^* 为多目标优化问题的 Pareto 最优解。

本文将输变电工程立项决策问题构建成为一个两阶段多目标的数学优化模型, 2 个阶段分别为立项阶段和决策阶段。

在立项阶段, 决策者主要考虑目前该部分电网是否存在某个缺陷, 比如供电能力不足、容载比过低或存在安全隐患等。根据现有电网的输变电工程立项评价指标体系(见图 1), 判断是否需要立项。若满足安全性 I 类指标要求, 则不需要立项; 反之, 则需要立项。因此, 立项阶段主要考虑安全性 I 类指标, 包含容载比、主变及线路的最大负载率等。

在决策阶段, 对于系统某个缺陷, 存在很多实施方案, 同时上报的方案并不一定是最好的, 所以决策者需要在众多方案中选取一种最优的方案, 或者通

过一定的方法去寻找出一种最优的方案。另一方面, 既然是因为安全性缺陷而立项, 那么所选的方案必须以满足安全性 I 类指标为前提, 继而再去寻找安全性 II 类、经济性^[12-13]、环境友好性、协调性^[14]、适应性^[14]等其他指标的最优性。因此, 决策阶段综合考虑安全性 I 类、安全性 II 类、经济性、环境友好性、适应性和协调性 6 个大类指标, 构建一个较为完整的输变电工程方案决策评价指标体系, 如图 2 所示。

2 双层多目标粒子群优化算法

2.1 标准粒子群优化算法

标准粒子群优化算法用一群粒子表示优化问题的潜在解。在 m 维的搜索空间中, 粒子 i 在 t 时刻的位置为 $x_i(t)$, 速度为 $v_i(t)$, 该粒子的历史最好位置记为 P_{best} , 而全部粒子经历过的最好位置记为 G_{best} 。粒子群优化算法中粒子通过不断更新自身的位置和速度向最优解飞行, 第 i 个粒子的速度和位置更新公式为:

$$\begin{aligned} v_i(t+1) &= \omega v_i(t) + c_1 r_1 [P_{best} - x_i(t)] + \\ &\quad c_2 r_2 [G_{best} - x_i(t)] \\ x_i(t+1) &= x_i(t) + v_i(t+1) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, r_1, r_2 为均匀分布在 $[0, 1]$ 区间的随机数; c_1, c_2 为群体认知系数, 一般 $c_1 = c_2 = 2$; 惯性权重 $\omega = 0.9 - 0.5i/T_{iter} + 1$, T_{iter} 为迭代的总次数。

2.2 自动寻优的双层多目标粒子群优化算法

输变电工程立项决策模型包含非常多的目标函数, 并且体现安全性 I 类指标的目标函数需要满足一定的安全限定, 同时又要尽可能被优化。由于安全性 I 类指标众多, 如果用罚函数处理这些指标并加入到约束中, 会导致搜索方向混乱, 优化时很难找到 Pareto 最优解。因此, 本文提出用双层多目标粒子群优化算法来求解这样的问题, 即在目标函数中, 有部

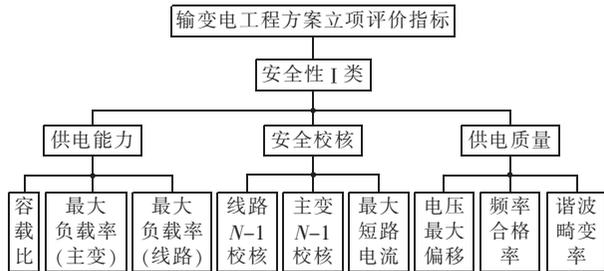


图 1 输变电工程立项评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system for transmission and transformation project approval

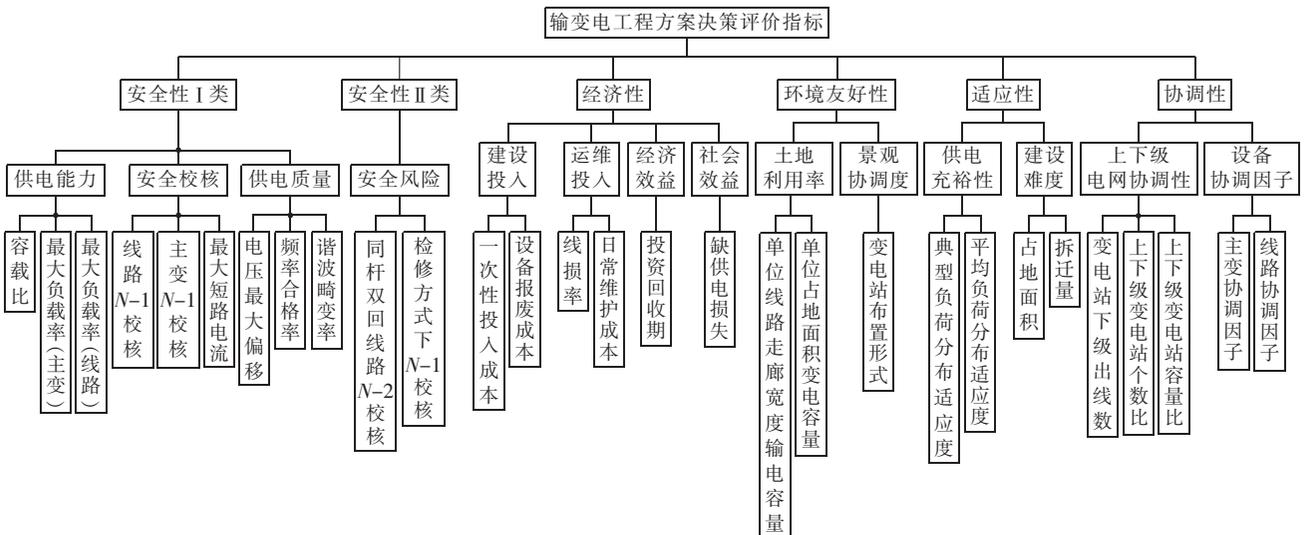


图 2 输变电工程决策评价指标体系

Fig.2 Evaluation index system of transmission and transformation project decision-making

分目标函数需要优先被满足。

本文用安全性 I 类的多个指标构成下层的多目标优化模型,将安全性 II 类、经济性、环境友好性、适应性和协调性作为目标函数,构成上层的多目标优化模型,从而形成一个双层多目标优化模型。其中下层模型为必要条件,上层模型则在下层模型的基础上进行优化。

2.2.1 自动寻优编码

在使用粒子群优化算法时,首先要根据数学模型的特点编制相应的解编码,使解从空间上映射到需要的数学表达方式,合理的编码方式有利于提高算法的整体效率。

对于输变电工程立项决策方案自动寻优算法而言,其解编码需要体现其具体的方案。对网架拓扑而言,节点集合和线路集合会发生变化。对于自动寻优机制,需要先输入可选的节点信息和线路信息,这些信息都可以用一个整数值表示,即对于可选的信息是选还是不选,如果选的话是选几个。

a. 可选的节点信息。因为对于一个具体的项目,若要新建或者扩建变电站,其容量等信息都是已知的,只要决策是新建还是扩建。所以编码的第一位按 0、1、2 编码,其中 0 为不建,1 为新建,2 为扩建,分别对应相应的可选节点信息。

b. 可选的线路信息。在可选的线路中,一般考虑每个通道最多建 4 回线,所以编码为 0、1、2、3、4,其中 0 表示不建,1、2、3、4 即为该通道新建的回路数,如果需要建更多回路数,可以根据具体情况设定相应的限值。编码的位数由可选的线路通道数决定。

假设某个项目有 5 个可选线路通道,并且需要新建或者扩建 1 个变电站,则其粒子的维数为 6。如图 3 所示,粒子的第 1 位表示新建变电站,第 2—6 位表示相应的线路通道新建线路的回数。

变电站	通道 1	通道 2	通道 3	通道 4	通道 5
1	1	0	2	0	4

图 3 6 维粒子编码示意图

Fig.3 Schematic diagram of 6-dimensional particle coding

2.2.2 上下层协调策略

上下层协调策略如图 4 所示,本文在上下层协调策略中设置了安全方案集和不安全方案集,先在下层多目标模型中计算安全性 I 类指标,若不满足指标要求则将方案提交至不安全方案集,并留下记录;反之则将方案提交至安全方案集,并通过综合评价方法计算其安全裕度,将具体方案和对应的安全裕度提交至上层多目标模型;然后进行上层多目标模型的优化,即安全性 II 类、经济性、适应性、环境友好性和协调性等其他特性指标的优化,进一步求解

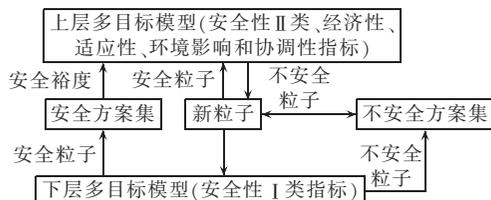


图 4 上下层协调策略

Fig.4 Coordination strategy between upper and lower layers

Pareto 最优解。

同时,在粒子更新过程中,将更新后的粒子与不安全方案集中的粒子以及安全方案集中的粒子进行比较:

- 若新粒子在不安全方案集中,则粒子选择再次更新,直至不在不安全方案集中;
- 若新粒子在安全方案集中,则保留在上层多目标模型中,等待下一次的迭代更新;
- 若新粒子既不在不安全方案集中,也不在安全方案集中,则将其移到下层多目标模型中,继续校验其安全性 I 类指标以及相应的安全裕度。

3 立项决策两阶段算法流程

基于输变电工程立项决策模型和双层多目标粒子群优化算法,形成一个两阶段双层多目标粒子群优化算法。整体上分为立项和决策 2 个阶段,在决策阶段又分为上下 2 层。在形成 Pareto 最优解后,通过综合评价方法对各个方案进行评价确定最优方案。

3.1 综合评价方法

本文的综合评价方法由组合赋权法^[15]先进行赋权,再由灰色关联分析法^[3]确定各个方案与理想方案的关联度,决策者根据关联度的大小判断方案的优劣。其中组合赋权法将主观和客观赋权法结合起来,既符合实际问题需要,又能兼顾数据客观波动的影响,其结构如图 5 所示。本文采用基于矩估计理论的组合赋权法。

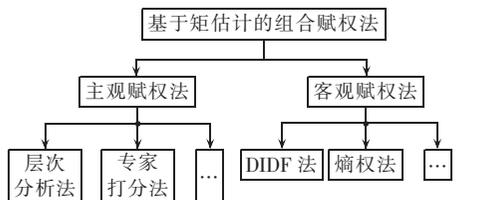


图 5 组合赋权法结构

Fig.5 Structure of combination weighting method

3.2 算法步骤

利用两阶段双层多目标粒子群优化算法求解输变电立项决策模型的计算步骤如下。

阶段一:立项阶段。读入原始数据,包括电力系统数据和算法初始参数;对整个系统进行潮流计算,

判断是否满足安全性 I 类指标要求,若满足则无需立项;反之则进入决策阶段。

阶段二:决策阶段。

步骤 1:读入方案初始数据,进入上层多目标模型;设置迭代种群规模,迭代次数 $t=0$,在控制变量变化范围内,随机初始化粒子群(初始种群规模大于迭代规模),每个粒子的个体极值和全局极值均为初始位置,同时设置精英集为空。

步骤 2:根据每个粒子对应的方案,对整个系统进行潮流计算,计算安全性 I 类指标对应的各个目标的适应值;将所求各个方案的安全性 I 类指标与安全极限进行比较,将满足安全性 I 类指标要求的方案放入安全方案集,不满足要求的方案则放入不安全方案集。

步骤 3:用综合评价方法评价安全方案的安全裕度,在初次迭代时,以安全裕度的高低选取迭代种群规模数量的安全方案,提交到上层多目标模型;在后续迭代中,若更新粒子均满足要求,则直接提交至上层多目标模型;若更新粒子不满足要求,则不进行更新。

步骤 4:进入上层多目标模型,对下层多目标模型优化提交的安全方案,计算出电网系统的安全性 II 类、经济性、环境友好性、适应性和协调性等这此目标函数值。

步骤 5:判断是否满足结束准则。达到最大允许迭代次数或最优解对应的目标函数值在给定的迭代步数内改变量小于给定值时,停止优化并输出结果,形成 Pareto 最优解,转至步骤 9;否则迭代次数 $t=t+1$,进入步骤 6。

步骤 6:根据 Pareto 支配概念,比较各个粒子之间的优劣,构造粒子群的非支配解集;通过比较非支配解集和精英集中解的 Pareto 支配关系,更新精英集;若精英集数量还未达到上限,则跳至步骤 7,反之则根据网格策略对精英集进行缩减。

步骤 7:更新粒子的个体极值和全局极值,全局极值采用随机从精英集中选择 1 个极值的策略,然后按式(3)更新粒子的速度,按式(4)更新粒子的位置,构造新粒子。

$$x_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t) + \frac{v_i(t+1)}{|v_i(t+1)|} & s(v_i(t+1)) > \text{rand}() \\ x_i(t) & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中, sigmoid 函数 $s(v_i) = \frac{1}{1 + \exp(-v_i)}$; $\text{rand}()$ 为随机函数。

步骤 8:判断新粒子是否在安全方案集中,若在则保留在上层多目标模型中,转到步骤 7,等待下一次的更新;反之再判断新粒子是否在不安全方案集

中,若在则转到步骤 7 再次更新粒子的速度和位置;若新粒子既不在安全方案集中,也不在不安全方案集中,则转到步骤 2,进入下层多目标模型,校验新粒子的安全性 I 类指标。

步骤 9:根据自动寻优的双层多目标粒子群优化算法得到的 Pareto 最优解,确定评价等级的范围,根据 3.1 节建立优化模型,将各种赋权法确定的指标权重进行优化组合求取最终的组合权重向量,利用灰色关联分析法结合由矩估计得到的综合权重形成最终的评价结果。

4 算例分析

4.1 算例介绍

以某供区电网为例进行仿真计算,验证本文算法的有效性。该原系统包含 20 个节点,3 台发电机,其拓扑结构见图 6。图中,节点 A—F 为 500 kV 电压等级的节点,节点 1—15 为 220 kV 电压等级的节点,方形节点为变压器节点。该供区原先有一个 500 kV 变电站(节点 A)、3 台 1000 MV·A 的主变。目前有一个项目上报,需要对其进行立项决策。该项目考虑选择扩建节点 A 的变电站(附带在节点 B 新建 220 kV 开关站,且附带新建节点 B 至节点 4—8 的 220 kV 线路)或者在节点 B 新建变电站,两者新增变电容量均为 2000 MV·A,其余可选新建线路信息见表 1。

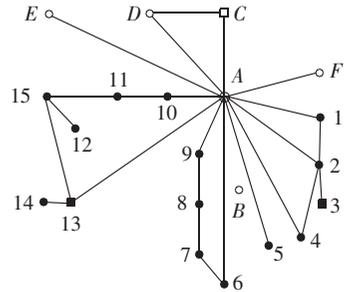


图 6 某供区电网拓扑图

Fig.6 Topology of a regional power grid

表 1 可选新建线路信息

Tab.1 Information of optional new lines

线路类型	编号	可选新建线路	可建最多回路数
220 kV 线路	L ₁	A-9	2
	L ₂	A-8	2
	L ₃	A-B	4
	L ₄	7-9	2
	L ₅	2-B	2
500 kV 线路	L ₆	A-B	2

4.2 立项决策过程

4.2.1 立项阶段

目前该供区需 500 kV 变电站网供负荷约为 2 400 MW,根据电力规划导则,500 kV 变电站容载比需在 1.5~1.9 之间,经计算该供区 500 kV 变电站容载比为 1.25,不满足安全性 I 类的指标,需要立项。

为了提高供电可靠性,必须提高变电容量。

4.2.2 决策阶段

本文以第 1 次迭代来说明本文算法的流程。首先根据自动寻优粒子编码方法,随机选取表 2 所示的初始粒子方案(新建/扩建一列中,数字 1 表示新建,数字 2 表示扩建,后同)。然后进入下层多目标模型,经过潮流计算,判断各个方案的安全性,得方案 4、5 不满足安全性 I 类指标,将其放入不安全方案集;方案 1、2、3、6(安全裕度分别为 0.680、0.705、0.784、0.839)满足安全性 I 类指标,将其放入安全方案集。用综合评价方法对安全方案集中的方案进行比选,并选出安全裕度较高的 4 个粒子方案(迭代种群规模为 4),提交至上层多目标模型。

表 2 初始粒子方案

Tab.2 Initial particle schemes

方案	新建/扩建	新建回路数						安全裕度
		L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	
1	2	2	1	2	2	0	0	0.605
2	2	0	0	4	0	2	0	0.698
3	1	2	1	0	0	0	2	0.856
4	2	0	1	0	1	0	0	0.839
5	2	2	2	0	1	0	0	0.680
6	1	2	1	0	2	2	2	0.705

在上层多目标模型中,通过对粒子方案的安全性 II 类、经济性、环境友好性、适应性和协调性计算比较后,将方案 1、2、3、6 均放入精英集,并根据粒子更新公式对各个粒子进行位置和速度的更新,得到新粒子方案见表 3。新粒子方案既没有在不安全方案集中,也没有在不安全方案集中,需要到下层多目标模型中再校验安全性。

表 3 新粒子方案

Tab.3 New particle schemes

方案	新建/扩建	新建回路数						安全裕度
		L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	
1 ⁽¹⁾	2	2	1	2	2	0	0	0.605
2 ⁽¹⁾	2	1	1	3	1	1	0	0.605
3 ⁽¹⁾	1	2	1	1	0	0	2	0.850
6 ⁽¹⁾	1	2	0	1	2	1	2	0.766

注:上标(1)表示迭代次数 1。

在下层多目标模型中,新粒子方案均满足安全性 I 类指标,将其加入到安全方案集,并提交至上层多目标模型。通过对粒子方案的安全性 II 类、经济性、环境友好性、适应性和协调性指标进行计算比较后,将方案 1⁽¹⁾、2⁽¹⁾、3⁽¹⁾、6⁽¹⁾均放入精英集。此时精英集中包括方案 1、2、3、6 和更新的方案 1⁽¹⁾、2⁽¹⁾、3⁽¹⁾、6⁽¹⁾,数量超过其规模上限(4 个),进行缩减,得到表 4。

按上述的过程不断迭代,不断更新粒子方案,直到得到最优解,然后通过综合评价方法得到方案的最终评价结果见表 5。

由表 5 可知,方案 3 的灰色关联度最高,为最优

表 4 更新后的精英集方案

Tab.4 Updated elitist particle schemes

方案	新建/扩建	新建回路数						安全裕度
		L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	
1	2	2	1	2	2	0	0	0.605
2	2	0	0	4	0	2	0	0.698
6	1	2	1	0	2	2	2	0.856
3 ⁽¹⁾	1	2	1	1	0	0	2	0.850

注:上标(1)表示迭代次数 1。

表 5 最终方案结果

Tab.5 Final scheme

方案	新建/扩建	新建回路数						灰色关联度
		L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	
1 ^(f)	2	2	1	2	1	0	0	0.685
2 ^(f)	2	0	0	4	0	2	0	0.754
3 ^(f)	1	2	1	1	0	0	2	0.780
6 ^(f)	1	1	1	2	0	0	2	0.724

注:上标(f)表示精英集中的最终方案。

方案。从评价结果看在节点 B 处新建变电站的方案更优,且安全裕度也更高。

5 结论

针对输变电工程立项决策问题,本文以安全性 I 类指标为前提,安全性 II 类、经济性、环境友好性、适应性和协调性指标为进一步优化目标,建立了一个较为完整的输变电工程立项决策方案评价体系的高维多目标优化问题。为了能更有效地求解该问题,提出自动寻优的两阶段双层多目标粒子群优化算法,能在保证安全性的情况下,有效地求解各个方案的评价指标,并用综合评价方法进行比选决策,选取最优方案。实际算例的应用结果表明该方法能有效地求解输变电工程立项决策问题。

参考文献:

- [1] 聂宏展,吕盼,乔怡,等. 基于熵权法的输电网规划方案模糊综合评价[J]. 电网技术,2009,33(11):60-64.
NIE Hongzhan,LÜ Pan,QIAO Yi,et al. Comprehensive fuzzy evaluation for transmission network planning scheme based on entropy weight method[J]. Power System Technology,2009,33(11):60-64.
- [2] 肖峻,王成山,周敏. 基于区间层次分析法的城市电网规划综合评判决策[J]. 中国电机工程学报,2004,24(4):50-57.
XIAO Jun,WANG Chengshan,ZHOU Min. An IAHP-based MADM method in urban power system planning[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(4):50-57.
- [3] 罗毅,李昱龙. 基于熵权法和灰色关联分析法的输电网规划方案综合决策[J]. 电网技术,2013,37(1):77-81.
LUO Yi,LI Yulong. Comprehensive decision-making of transmission network planning based on entropy weight and grey relational analysis[J]. Power System Technology,2013,37(1):77-81.
- [4] SRINIVAS N,DEB K. Multiobjective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation,1994,2(3):221-248.
- [5] DEB K,PRATAP A,AGARWAL S,et al. A fast and elitist multi

- objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [6] 黄映, 李扬, 高赐威. 基于非支配排序差分进化算法的多目标电网规划[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 85-89.
HUANG Ying, LI Yang, GAO Ciwei. Multi-objective transmission network planning based on non-dominated sorting differential evolution[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 85-89.
- [7] 王秀丽, 李淑慧, 陈皓勇, 等. 基于非支配遗传算法及协同进化算法的多目标多区域电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 11-15.
WANG Xiuli, LI Shuhui, CHEN Haoyong, et al. Multi-objective and multi-district transmission planning based on NSGA-II and cooperative co-evolutionary algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 11-15.
- [8] SIERRA M R, COELLO C A C. Improving PSO-based multi-objective optimization using crowding, mutation and e-dominance [C]//Evolutionary Multi-Criterion Optimization. [S.l.]: Springer, 2005: 505-519.
- [9] 刘文颖, 谢昶, 文晶, 等. 基于小生境多目标粒子群算法的输电网检修计划优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 141-148.
LIU Wenying, XIE Chang, WEN Jing, et al. Optimization of transmission network maintenance scheduling based on niche multi-objective particle swarm algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 141-148.
- [10] 公茂果, 程刚, 焦李成, 等. 基于自适应划分的进化多目标优化非支配个体选择策略[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(4): 545-557.
GONG Maoguo, CHENG Gang, JIAO Licheng, et al. Nondominated individual selection strategy based on adaptive partition for evolutionary multi-objective optimization[J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(4): 545-557.
- [11] 俞立平, 潘云涛, 武夷山. 一种新的客观赋权科技评价方法——独立信息数据波动赋权法 DIDF[J]. 软科学, 2010, 24(11): 32-37.
YU Liping, PAN Yuntao, WU Yishan. A new objective weighting method of sci-tech evaluation—independent information data fluctuation weighting method DIDF[J]. Soft Science, 2010, 24(11): 32-37.
- [12] 柳璐, 程浩忠, 马则良, 等. 考虑全寿命周期成本的输电网多目标规划[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 46-54.
LIU Lu, CHENG Haozhong, MA Zeliang, et al. Multi-objective transmission expansion planning considering life cycle cost[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 46-54.
- [13] 蔡亦竹, 柳璐, 程浩忠, 等. 全寿命周期成本(LCC)技术在电力系统中的应用综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 149-154.
CAI Yizhu, LIU Lu, CHENG Haozhong, et al. Application review of life cycle cost(LCC) technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 149-154.
- [14] 傅美平. 电网协调程度评估及协调规划方法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
FU Meiping. Research on evaluation of power network coordination and its coordinated planning[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.
- [15] 沈阳武, 彭晓涛, 施通勤, 等. 基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 67-73.
SHEN Yangwu, PENG Xiaotao, SHI Tongqin, et al. A grey comprehensive method of power quality based on optimal combination weight[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 67-73.

作者简介:



徐凯

徐凯(1988-),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统经济调度、优化计算与综合评价(E-mail: hzxk@zju.edu.cn);

陈宏伟(1986-),男,浙江杭州人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统规划与设计、电能质量、牵引供电品质(E-mail: chen_hongwei1986@163.com)。

Decision-making based on two-stage bi-level multi-objective particle swarm optimization algorithm for power transmission and transformation project approval

XU Kai¹, CHEN Hongwei², SUN Ke³, JIANG Quanyuan¹, DING Xiaoyu², ZHENG Chaoming³

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Provincial Electric Power Design Institute, Hangzhou 310012, China;

3. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China)

Abstract: A two-stage multi-subject decision-making model is built for the approval of power transmission and transformation projects and the determination of implementation scheme, which includes two stages (project approval, decision-making) and five indices (security, economy, environmental friendliness, adaptability, coordination). A two-stage multi-objective particle swarm optimization algorithm is proposed to calculate the optimal Pareto solution of the model. A comprehensive evaluation method is adopted to select the optimal implantation scheme. Case study demonstrates the validity and effectiveness of the proposed model.

Key words: power transmission and transformation project; decision making; models; bi-level multi-objective particle swarm optimization; optimization; comprehensive evaluation