

# 基于向量序优化的多目标输电网规划方法

谢敏<sup>1</sup>, 宋海鹰<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东技术师范学院自动化学院, 广东 广州 510635)

**摘要:** 引入了向量序优化理论求解输电网的多目标静态规划问题。以最大化输电方、发电方以及用户方电力市场三大成员的自身利益为优化目标, 建立了以输电网扩建投资最小、系统发电费用最小、以及负荷损失费用最小为优化目标的多目标规划模型, 并采用向量序优化理论求解足够好的全局非劣解。基于 Garver 系统的仿真试验表明, 充分利用了各子目标的优化信息, 克服了大规模输电网规划过程中存在的“维数灾”问题, 并大幅度提高了计算效率, 使优化求解时间由 41.7 h 下降为 0.26 h, 降低了 99.4%。

**关键词:** 向量序优化; 输电网规划; 多目标优化

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2011)01-0064-06

## The Planning Method of Multi-Objective Transmission Network Based on Vector Ordinal Optimization Theory

Xie Min<sup>1</sup>, Song Haiying<sup>2</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510635, China;

2. School of Automation, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510635, China)

**Abstract:** The vector ordinal optimization theory is firstly introduced to solve the multi-objective static transmission network planning problem. To maximize the benefits of transmission owners, generators and customers, a multi-objective optimization model considering minimization of expansion of investment costs, generation costs and possible outage costs respectively is built. Then vector ordinal optimization theory is used to get the good enough solutions. The Garver system simulation results show that the method makes full use of the information from the multiple objectives, overcomes the curse of dimensionality and significantly improves the computational efficiency. The computation time is decreased from 41.7h to 0.26h, reducing about 99.4%.

**Keywords:** vector ordinal optimization; transmission expansion planning; multi-objective optimization

## 0 引言

电网规划是电力系统安全稳定运行的前提。在输电网规划过程中通常需要考虑和权衡众多因素的影响, 其实质是复杂的多目标优化问题。尤其在电力市

场兴起后, 发、输、甚至配电的分离为传统的输电网规划工作带来新的挑战。在规划过程中不仅考虑电网所有者的经济利益, 还需要同时考虑发电厂商以及用户等其他市场成员的利益, 因此, 市场环境下的输电网规划呈现更为突出的多目标优化属性。如何在规划

收稿日期: 2010-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50907023), 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009ZM0213), 广东省自然科学基金博士启动资助项目(9451064101003157)

作者简介: 谢敏(1978-), 女, 湖南衡阳人, 华南理工大学讲师, 博士, 主要从事电力系统优化和规划方面的研究,

E-mail: minxie@scut.edu.cn

过程中有效考虑和综合评估各市场成员的利益成为输电网规划的关键,也是难点之一。

目前,多目标输电网规划均是通过加权求和,将多目标优化问题转化为单目标优化问题进行求解<sup>[1-4]</sup>。这种加权求和整合目标函数的方法能够带来求解的便利,但对各个优化子目标的影响考虑得不充分,且多目标整合所采用的权值参数的选取仍未有统一原则可循,权值的选取会直接影响优化结果。此外,转化后的单目标优化问题多采用运筹学方法或智能化方法求解,其计算量由规划问题的规模决定,对于大规模或超大规模输电网,不可避免存在“维数灾”的问题。

本文在综合考虑输电方、发电方以及用户方三大主要电力市场成员自身利益的前提下,建立了以输电网扩建投资最小、系统发电费用最小、以及各种预想事故情况下的负荷损失费用最小为优化子目标的多目标输电网静态规划模型;并首次引入向量序优化(vector ordinal optimization, VOO)理论直接对该多目标优化问题进行足够好全局非劣解的求取,避免了将多目标优化问题转化为单目标优化问题求解过程中存在的“维数灾”弊端,在充分利用各优化子目标信息的前提下,大大提高了计算效率。在Garver系统上进行了仿真试验,结果表明,基于向量序优化理论的多目标输电网规划方法是有效的,具有较好实用价值。

## 1 向量序优化理论

20世纪90年代,哈佛大学何毓琦教授提出了求解单目标复杂优化问题的序优化理论<sup>[5-9]</sup>,并逐步推广应用到工业控制领域。随后,清华大学赵千川教授等<sup>[10-11]</sup>在序优化理论的基础上,提出了向量序优化,以求解工业复杂控制过程中的多目标优化问题。向量序优化的基本思想可用以下4个步骤来描述:

1) 为体现整个解空间的特点,从优化问题的可行域中随机抽取一定数量 $N$ 的可行解组成表征集合 $\Theta_N$ ,后续操作将直接在 $\Theta_N$ 上开展。

2) 向量序优化理论将世界上所有的多目标优化问题划分为3类(Flat类、Neutral类和Steep类),每一类可用图1所示的一条特定形状的OPC(ordered performance curve)曲线进行描述。

向量序优化针对各个子优化目标函数的特点,建立对应的粗糙评估模型,从而对集合 $\Theta_N$ 各个可行解进行快速评估并排序分层(分层方法详见文献[10]),每一层上的解互为非劣。因此,图1以层的序号为横坐标,并以该层及性能优于该层的所有层上可行解的总个数为纵坐标画曲线,即得OPC曲线。

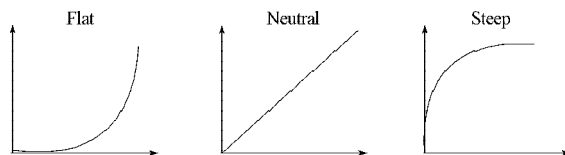


图1 不同类型多目标优化问题的OPC曲线

Fig.1 Types of ordinal performance curves(OPCs) for VOO

3) 根据粗糙评估结果的误差分布情况,确定粗糙分层中应选取的最优层数记为 $s$ ,这 $s$ 层包含的可行解即构成选定集合 $S$ ,且 $S$ 中将以至少 $\alpha\%$ 的概率包含 $k$ 个足够好的解<sup>[11]</sup>,如式(1)所示。

$$\Pr\left\{\left|S \cap P\right| \geq k\right\} = \Pr\left\{\left|\left(\bigcup_{i=1}^s \hat{L}_i\right) \cap \left(\bigcup_{j=1}^p L_j\right)\right| \geq k\right\} \geq \alpha\%, \quad (1)$$

式(1)中: $k$ 和 $\alpha\%$ 为规划人员事先给定值( $\alpha\%$ 一般为95%); $\Pr\{\}$ 表示概率, $|\cdot|$ 表示集合元素的个数;集合 $P$ 为准确仿真计算后 $\Theta_N$ 集合中的实际足够好解集合; $\hat{L}_i$ 表示粗糙评估分层后的第 $i$ 层; $L_j$ 表示通过准确仿真计算对 $\Theta_N$ 集合进行排序分层,所得的第 $j$ 层。

4) 对 $S$ 集合中的每个可行解进行准确评估,即对其子目标函数值进行准确详细的仿真和计算,并排序分层,从其第一层(即Pareto非劣解)中取 $k$ 个作为最终优化结果。

## 2 采用向量序优化求解多目标输电网规划的基本思路

在建立输电网规划问题多目标模型的基础上,根据模型的约束条件,从可行解空间中随机抽取 $N$ 个可行解(即,规划方案);随后,建立各优化子目标函数的粗糙评估模型,通过计算 $N$ 个可行解各自子目标函数的粗糙评估值能够对可行解的优劣进行分层排序;基于分层排序的结果,进一步描绘出OPC曲线,并根据OPC曲线的形状确定该多目标电网规划问题所属的优化类型(即,Flat类、Neutral类和Steep类)。然后,根据文献[10]的仿真结果以及粗糙评估值的误差分布情况,在规划人员给定 $p$ , $k$ 和 $\alpha\%$ 值的基础上,确定需要从粗糙评估排序结果中挑取出的选定集合 $S$ 的大小。最后,逐一 $S$ 集合中各可行规划方案对应的子目标函数的精确值进行准确仿真和计算,并根据仿真结果对 $S$ 集合进行准确排序分层,抽取前 $k$ 个最优解作为最终优化结果。可见,基于向量序优化理论的多目标输电网规划的核心是如何对 $\Theta_N$ 集合中的可行解的优劣进行快速评估,即建立各优化子目标函数的粗糙评估模型,该部分内容详见第3节。

因此,基于向量序优化的多目标输电网规划方法避免了常规的将多目标通过加权求和方式转化为单目标优化问题的求解方法,利用对可行解空间的抽样和优化子目标函数值的评估计算避免了对规划问题直接求解而可能带来的“维数灾”问题,同时能够更加全面地权衡各优化子目标,使多目标优化结果更能符合工程实际的需要。

### 3 多目标输电网静态规划模型及其粗糙评估

从电网扩建方案的经济性和系统运行的安全性角度出发,综合考虑输电方、发电方和用户方等三大市场成员各自的利益,本文建立了如下的多目标输电网静态规划模型。

$$\begin{cases} \min_{\theta \in \Theta} \{C_{I_\theta}\}, \\ \min_{\theta \in \Theta} \{C_{G_\theta}\}, \\ \min_{\theta \in \Theta} \{C_{L_\theta}\}, \\ \text{s.t. } \{\text{电力系统运行结束}\}, \end{cases} \quad (2)$$

式中: $C_{I_\theta}$ ,  $C_{G_\theta}$ ,  $C_{L_\theta}$ 分别表示规划方案 $\theta$ 的输电网扩建投资,系统购电费用,以及负荷损失费用;下标 $\theta$ 表示解空间 $\Theta$ 中的任一可行规划方案。为简单起见,下文计算变量均省略了下标 $\theta$ 。

在输电网规划中,电力系统运行一般仅考虑有功分布情况,因此,本文考虑的运行约束主要包括输电线路有功功率上下限约束、发电机有功出力上下限约束、以及各节点的有功平衡约束,详见以下各子优化模型。且假定电网各节点负荷与系统总负荷成定比例增长。

#### 3.1 输电网扩建投资费用的计算

输电网扩建投资费用计算公式如下式。

$$C_I = \sum_{j=1}^m I_j, \quad (3)$$

式(3)中: $m$ 表示允许新建线路的输电走廊数; $I_j$ 表示输电走廊 $j$ 的扩建投资费用,即为该输电走廊上所有新建线路投资之和。由于 $C_I$ 的计算比较简单,因此,其粗糙计算模型直接采用式(3)所示的准确评估模型即可。

#### 3.2 系统发电费用的计算

##### 3.2.1 精确计算

系统发电费用是指电网正常运行情况下,整个规划期内全网发电机组的发电费用之和。给定目标规划期内负荷曲线的情况下,需要逐小时模拟电网运行情况才能准确计算出 $C_G$ 的值,本文采用最优直流潮流模型计算 $C_G$ 值。

假定电力市场中各发电厂均采用线性边际报价曲线,各发电机组的发电费用为发电有功的二次函数,因此 $C_G$ 的最优直流潮流模型即为二次规划模型,如式(4)所示:

$$\begin{cases} \min C_{G_h} = \sum_{j=1}^{N_g} f(P_{g_j}) = \sum_{j=1}^{N_g} (c_{2j} P_{g_j}^2 + c_{1j} P_{g_j} + c_{0j}), \\ \text{s.t. } a) -\overline{P}_i \leq P_i \leq \overline{P}_i, \quad i=1,2,\dots,N_l, \\ b) \underline{P}_{g_j} \leq P_{g_j} \leq \overline{P}_{g_j}, \quad j=1,2,\dots,N_g, \\ c) \sum_{j=1}^{N_g} P_{g_j} = P_{d_h}^s, \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: $C_{G_h}$ 为第 $h$ 小时对应的系统发电费用; $P_{g_j}$ 为发电机 $j$ 的有功出力; $P_i$ 为线路 $i$ 的有功潮流; $f(P_{g_j})$ 为发电机 $j$ 的发电费用二次函数;约束条件中 $\overline{P}_i$ 为线路 $i$ 的最大允许输送有功; $\underline{P}_{g_j}$ 和 $\overline{P}_{g_j}$ 分布为发电机最小、最大允许有功出力; $P_{d_h}^s$ 为第 $h$ 小时的系统总负荷水平; $N_g$ 和 $N_l$ 分别表示全网的发电机台数和线路数。

规划期内的总发电费用如式(5)所示,其所得的 $C_G$ 值为精确评估值。

$$C_G = \sum_{h=1}^H C_{G_h}, \quad (5)$$

式中: $H$ 为规划期的总小时数。

##### 3.2.2 基于季典型日的粗糙评估

由于准确计算 $C_G$ 值难度较大,需要逐年逐小时对电网进行运行模拟,即求解式(4)。因此,本文建立了季典型日发电费用的粗糙评估模型以对精确值进行逼近,首先分别选取一年中春夏秋冬每个季节的典型日负荷曲线,则每个季节的发电费用可用该季典型日发电费用乘以该季节的总天数来快速估算。其中,季典型日负荷曲线可通过负荷预测得到,也可以该季内的平均日负荷曲线来代替。季典型日发电费用粗糙计算模型为:

$$\hat{C}_G = \sum_{j=1}^4 \left( d_j \times \sum_{h=1}^{24} C_{G_h} \right), \quad (6)$$

式中, $d_j$ 为每一季的天数。以下均以“~”表示粗糙评估值。

#### 3.3 失负荷损失费用的计算

##### 3.3.1 精确计算

当电网发生故障时,电网安全稳定运行受到威胁,可通过减负荷操作来保证系统运行的安全性。减负荷会造成用户停电,其所带来的经济损失可采用二次、指数,或是双曲函数的表达形式。文中采用式(7)所示的二次函数来描述失负荷损失费用值<sup>[12]</sup>:

$$\varphi_h(\Delta) = \frac{4\xi}{(P_{D_h})^2} \Delta^2, 1 \leq h \leq H, \quad (7)$$

式(7)中:  $\varphi(\cdot)$ 为失负荷损失费用函数;  $\Delta$ 为失负荷功率; 下标  $h$ 表示第  $h$ 小时;  $\xi$ 为当失掉一半负荷时对应的损失费用, 在欧洲通常以30~60倍正常电价计算<sup>[13]</sup>。

因此, 在第  $h$ 小时的负荷水平下, 某项预想事故所造成的全网失负荷损失费用为输电网各节点损失费用之和, 即

$$C_{L_h} = \sum_{n=1}^{N_b} \varphi(P_{D_h}^n - P_{d_n}), 1 \leq h \leq H, \quad (8)$$

式(8)中:  $N_b$ 为电网的节点总数;  $P_{D_h}^n$ 为节点  $n$ 上的负荷需求值, 由负荷预测给出;  $P_{d_n}$ 为故障削减负荷后, 该节点上实际能够供给的负荷功率。求解故障情况下各节点的失负荷功率时采用如下所示的最优直流潮流二次优化模型。

$$\begin{cases} \min \left\{ \sum_{n=1}^{N_b} \varphi(P_{D_h}^n - P_{d_n}) + \sum_{j=1}^{N'_g} f(P_{g_j}) \right\}, \\ \text{s.t. } a) \quad -\bar{P}_i \leq P_i \leq \bar{P}_i, i=1,2,\dots,N'_i, \\ b) \quad \underline{P}_{g_j} \leq P_{g_j} \leq \bar{P}_{g_j}, j=1,2,\dots,N'_g, \\ c) \quad \sum_{j=1}^{N'_g} P_{g_j} = \sum_{n=1}^{N_b} P_{d_n}, \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中:  $N'_i$ 和  $N'_g$ 分别为故障后的输电线路数与发电机组数; 其控制变量包括发电机发电功率  $P_{g_j} (j=1,2,\dots,N'_g)$  和采取减载措施后各节点的实际负荷功率  $P_{d_n} (n=1,2,\dots,N_b)$ 。

若给定各个预想事故概率, 由式(10)即可得扩建后的电网在各种预想事故情况下的失负荷损失费用值,

$$C_L = \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^M \eta_j \cdot C_{L_{h,j}}, \quad (10)$$

式(10)中:  $M$ 表示所考虑的预想事故数;  $\eta_j$ 表示预想事故  $j$ 发生的概率;  $C_{L_{h,j}}$ 为第  $h$ 小时下发生故障  $j$ 的失负荷损失费用值, 采用模型(10)求解。

### 3.3.2 基于分段线性化的粗糙评估

仿真发现, 基于式(10)的  $C_L$ 精确值相对系统负荷增长具有近似分段线性的特征, 如图2中的曲线  $a$ 所示。

针对这一规律, 本文将系统负荷分成[谷荷, 基荷]、[基荷, 腰荷]、[腰荷, 峰荷]3个区间, 对这3个区间内的失负荷损失费用变化情况以线性函数逼近, 近似过程如图2中的曲线  $b$ 所示。因此, 只需精确计算上述3个负荷区间端点(即谷荷、基荷、腰荷和峰荷)

对应的  $C_L$ 值, 区间内的  $C_L$ 值可按式(11)所示的线性化予以近似:

$$\hat{C}_{L_h} = \frac{C_L^{(i+1)} - C_L^{(i)}}{P_D^{s(i+1)} - P_D^{s(i)}} (P_{d_h}^s - P_D^{s(i)}) + C_{L_h}^{(i)}, \quad h=1,2,\dots,H, i=1,2,3, \quad (11)$$

式(11)中: 当  $i=1,2,3$ 时,  $C_L^{(i)}$ 和  $C_L^{(i+1)}$ 即为  $C_L^{(1)}$ ,  $C_L^{(2)}$ ,  $C_L^{(3)}$ ,  $C_L^{(4)}$ , 分别表示谷荷、基荷、腰荷以及峰荷处的  $C_L$ 精确值, 直接由式(10)计算; 相应地,  $C_L^{s(i)}$ 和  $C_L^{s(i+1)}$ ,  $C_L^{s(2)}$ ,  $C_L^{s(3)}$ ,  $C_L^{s(4)}$ 即代表  $P_D^{s(1)}$ ,  $P_D^{s(2)}$ ,  $P_D^{s(3)}$ ,  $P_D^{s(4)}$ , 分别表示系统谷荷、基荷、腰荷以及峰荷值, 可由负荷预测给出。

因此, 规划期内的总失负荷费用粗糙评估值为:

$$\hat{C}_L = \sum_{h=1}^H \hat{C}_{L_h}. \quad (12)$$

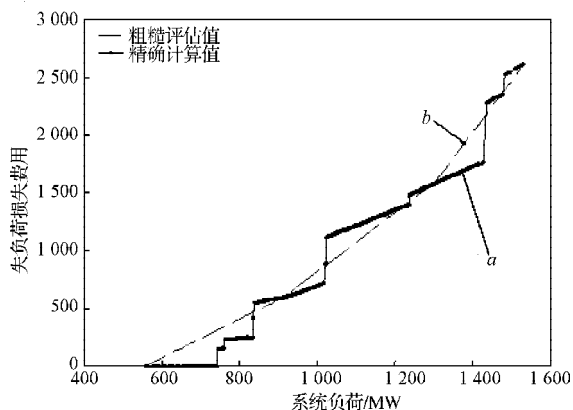


图2 失负荷费用相对系统负荷增长变化的曲线

Fig. 2 The curve of load loss cost vs increase of system load

## 4 算例

本算例基于著名的 Garver 电力系统, 系统接线如图3所示。

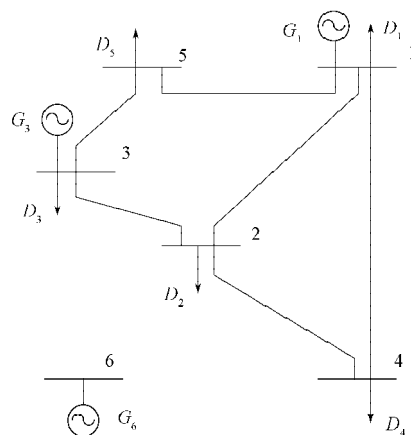


图3 6节点 Garver 系统接线示意图

Fig. 3 6-bus Garver system

预想故障考虑  $N-1$  故障, 且假设已建线路断线概率为0.1, 新建线路断线概率为0.05。考虑的目标规划

期为1 a (8 760 h)。系统负荷曲线上峰荷为1 530.0 MW, 谷荷为 558.4 MW, 系统基荷水平取为峰荷的 60%, 腰荷水平取为峰荷的 85%; 季典型日负荷曲线取为季平均日负荷曲线。

1) 生成 $\Theta_N$ 集合

以在系统峰荷水平下满足式(2)中所有约束条件的解为可行解, 随机生成 $N=1\ 000$ 的可行解集合 $\Theta_N$ 。

2) 获得 OPC 曲线

根据式(3), (6)和(12)对规划方案的投资费用、发电费用以及失负荷损失费用进行快速计算并排序分层, 绘制的 OPC 曲线示于图 4 中。

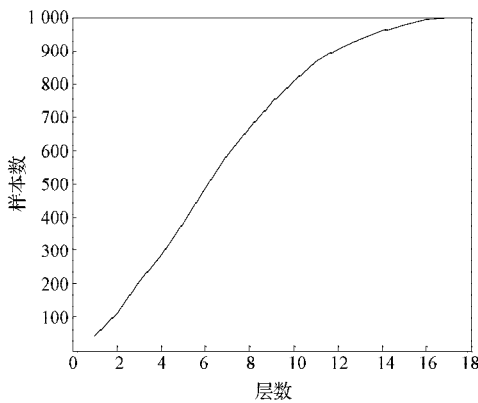


图 4 Garver 系统多目标输电网静态规划 OPC 曲线

Fig. 4 OPC for static multi-objective transmission planning of Garver system

3) 构建选定集合 S

对比图 2, 考虑比较保守的情况, 将本算例视为一 Neutral 型三目标优化问题; 且通过归一化处理,  $\hat{C}_G$  相对于精确值的误差分布近似为均值 0.012 7, 方差 0.056 的正态分布;  $\hat{C}_L$  相对于其精确值的误差分布近似为均值 -0.024 3, 方差 0.120 1 的正态分布。

若要求 S 以至少的概率包含至少 3 个真实足够好的解, 且该足够好的解定义为经过精确计算后 $\Theta_N$ 集合中的真实 Pareto 非劣解, 即令 $\alpha\% = 95\%$ ,  $k = 3$ ,  $p = 1$ , 由文献[10], 只需对粗糙评估分层中的前 2 层, 共 93 个可行解进行精确计算, 求取其中的真实足够好解即可。

4) 确定 S 集合中所包含的足够好解

根据式(3), (5)和(10), 对该 93 个可行解进行精确计算并排序分层, 选取第一层 (Parato 层) 中的 3 个解, 即为最终结果。

为验证 S 集合中包含真实足够好解的情况, 我们同时对 $\Theta_N$ 集合中的所有可行解进行精确计算。在表 1 中列出了 $\Theta_N$ 集合中的所有 Parato 最优解, 同时还对照列出了 S 集合所包含的所有可行解, 二者的交集即为 S 集合中包含的真实足够好解 (表中以加框阴影表

示), 共有 13 个解。

可见, S 中确实包含 13 个真实足够好解, 远大于预先设置的 $k=3$ 个, 计算结果较为保守。该 13 个足够好解的详细情况列于表 2 中。规划人员即可根据需要对该 13 个足够好解中挑选 3 个作为最终优化方案。

表 1 S 集合包含真实足够好解的情况对比表

Table1 The subset S and the true good enough solutions

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| S 集合                              | 979, 752, 755, 944, 650, 78, 474, 79, 62, 671, 57, 531, 596, 95, 257, 570, 808, 55, 756, 166, 772, 346, 274, 987, 492, 112, 562, 598, 339, 898, 941, 920, 351, 449, 965, 691, 517, 200, 642, 925, 326, 714, 162, 58, 343, 165, 136, 951, 325, 201, 226, 894, 604, 890, 636, 767, 914, 59, 682, 289, 246, 396, 335, 866, 950, 277, 127, 736, 568, 518, 283, 442, 735, 211, 726, 143, 674, 415, 865, 893, 7, 187, 902, 773, 836, 888, 532, 68, 82, 559, 954, 551, 145 |
| $\Theta_N$ 集合的所有真实 Pareto 非劣解集合 P | 979, 752, 755, 944, 78, 881, 671, 57, 531, 570, 808, 55, 335, 716, 211, 619, 535, 214   |

注 表中的数字表示解的编号

表 2 选定集合 S 中包含的真实足够好解

Table2 The good enough planning schemes in the selected subset S

| 解编号 | 对应规划方案                          | 投资费用 | 系统购电费用    | 负荷损失费用 |
|-----|---------------------------------|------|-----------|--------|
| 55  | 1, 1, 1, 1, 1, 0, 4, 1, 1, 4, 2 | 63.8 | 26 500.37 | 12.14  |
| 57  | 1, 1, 1, 1, 1, 1, 3, 1, 1, 2, 2 | 58.5 | 26 500.37 | 111.93 |
| 78  | 1, 1, 2, 1, 0, 1, 3, 1, 1, 3, 1 | 55.7 | 26 500.37 | 321.85 |
| 211 | 1, 1, 1, 1, 1, 0, 4, 0, 1, 3, 4 | 71.0 | 26 500.37 | 0.85   |
| 335 | 1, 1, 1, 1, 1, 1, 3, 2, 1, 4, 2 | 66.8 | 26 500.37 | 11.07  |
| 531 | 1, 1, 2, 1, 1, 1, 3, 2, 2, 2, 1 | 61.5 | 26 500.37 | 108.45 |
| 570 | 2, 1, 2, 1, 1, 1, 3, 0, 1, 2, 2 | 62.8 | 26 500.37 | 91.54  |
| 671 | 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 2 | 57.8 | 26 500.37 | 296.85 |
| 752 | 0, 0, 2, 1, 1, 0, 3, 1, 1, 3, 1 | 43.7 | 26 571.92 | 726.71 |
| 755 | 0, 1, 2, 1, 0, 0, 3, 2, 1, 3, 1 | 49.7 | 26 500.37 | 809.79 |
| 808 | 1, 1, 1, 1, 1, 1, 4, 1, 2, 3, 1 | 63.5 | 26 500.37 | 84.09  |
| 944 | 0, 1, 2, 1, 1, 0, 3, 1, 2, 2, 1 | 51.5 | 26 500.37 | 677.04 |
| 979 | 1, 0, 1, 1, 0, 0, 3, 1, 1, 3, 1 | 43.7 | 26 529.60 | 737.87 |

注 表中的规划方案由一连串数字构成, 这些数字表示相应输电走廊上新建的输电线路数目, 数字的排序与附录 A 中线路参数表中的线路编号一致

上述仿真计算在 Pentium 4, 1.4 GHz, 512 MB 内存的计算机上进行, 采用向量序优化方法进行 Parato 最优解的求解需 15.3 min (即, 0.26 h); 而对 $\Theta_N$ 集合中所有可行解进行精确评估则需 41.7 h。可见, 本文提出的基于向量序优化的多目标输电网规划方法在避免“维数灾”问题的前提下, 大大提高了计算效率, 计算时

间降低至精确评估的0.6%。

## 5 结语

本文首次引入向量序优化理论,在充分利用各子目标优化信息的基础上,直接对多目标输电网静态规划模型进行求解,有效避免了“维数灾”问题。仿真试验结果表明,基于向量序优化理论的多目标输电网规划方法能够大幅提高计算效率,具有较好的实用价值。

### 参考文献:

- [1] 任萍,李楠.集成粒子群优化算法在电网规划中的应用[J].系统仿真学报,2007,19(10):2370-2373.  
Ren Ping, Li Nan. Application of Integrated Particle Swarm Optimization to Transmission Network Optimal Planning[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(10): 2370-2373.
- [2] 屈刚,程浩忠,马则良,等.考虑联络线传输功率的双层分区多目标输电网规划[J].中国电机工程学报,2009,29(31):40-46.  
Qu Gang, Cheng Haozhong, Ma Zeliang, et al. Bi-Level Multi-Objective Transmission Planning with Consideration of Tie-Line Power Transfer Capability[J]. Proceedings of CSEE, 2009, 29(31): 40-46.
- [3] 伍力,吴捷,钟丹虹.多目标优化改进遗传算法在电网规划中的应用[J].电力系统自动化,2000,24(12):45-48.  
Wu Li, Wu Jie, Zhong Danhong. Application of an Improved Genetic Algorithm in Multi-Objective Power Network Optimization Planning[J]. Power System Automation, 2000, 24(12): 45-48.
- [4] 程浩忠,高赐威,马则良,等.多目标电网规划的分层最优化方法[J].中国电机工程学报,2003,23(10):11-16.  
Cheng Haozhong, Gao Ciwei, Ma Zeliang, et al. The Lexicographically Stratified Method for Multi-Object Optimal Electric Power Network Planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 11-16.
- [5] Ho Y C, Sreenivas R S, Vakili P. Ordinal Optimization in DEDS[J]. Journal of Discrete Event Dynamic Systems, 1992, 2: 61-68.
- [6] Ho Y C. Overview of Ordinal Optimization [C]//Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control, Florida: Lake Buena Vista, 1994: 1975-1977.
- [7] Edward Lau T W, Ho Y C. Universal Alignment Probabilities and Subset Selection for Ordinal Optimization[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1997, 93(3): 455-489.
- [8] Dai L. Convergence Properties of Ordinal Comparison in the Simulation of Discrete Event Dynamic Systems[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1996, 91: 363-388.
- [9] Li D, Lee L H, Ho Y C. Constrained Ordinal Optimization [J]. Information Sciences, 2002, 148: 201-220.
- [10] Zhao Q C, Ho Y C, Jia Q S. Vector Ordinal Optimization [EB/OL]. [2010-11-14]. <http://cfins.au.tsinghua.edu.cn/personalhg/jiaqingshan/ZhaoHoJiaVOO2004.pdf>.
- [11] Zhao Q C, Ho Y C, Jia Q S. Vector Ordinal Optimization [J]. Journal of Optimization Theory and Application, 2005, 125(2): 259-274.
- [12] Wollenberg B F, Fegley K A. A Cost Effective Security Dispatch Methodology[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & System, 1976, PAS-95(1): 401-410.
- [13] Conforti, Menniti D D, Sorrentino N, et al. Optimal Load-Flow with N-1 Steady-State Security Via High Performance Computing[C]//Proceedings of the Mediterranean Electrotechnical Conference-MELECON, Industrial Applications in Power Systems, Computer Science and Telecommunications, 1996, 2: 873-879.

(责任编辑:罗立宇)