

输电线扩展规划分支定界算法

赵洪山, 陈亮

(华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 研究了输电线扩展规划的分支定界算法。为了对输电线扩展规划的各种预选方案进行综合分析, 提出了规划集的概念, 并建立了输电线扩展规划分支定界算法的优化数学模型。该模型以投资费用和运行成本最小为目标, 以电力系统潮流为约束条件, 利用内点法作为求解松弛子问题的算法, 给出了输电线扩展规划分支定界算法的详细计算步骤, 并在 IEEE39 节点测试系统和某地区实际电网的输电线扩展规划中运用所提出的方法进行了仿真。仿真结果表明, 该方法不必进行遍历搜索就能够快速得到投资和运行成本最低的投建线路, 计算量小, 效率高。

关键词: 输电线规划; 规划集; 分支定界法

Transmission line expansion planning branch and bound method

ZHAO Hong-shan, CHEN Liang

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Transmission line expansion planning branch and bound method is given. First, to analyze all candidate strategies synthetically, a planning set is defined, and transmission line expansion planning branch and bound optimal computation model is founded. The object of this model is to minimize the investments as well as operational costs, and its constraint is the equation of power flow. Then, the interior point method is used as the algorithm to solve relaxed sub-problems, the detail steps of transmission line expansion planning branch and bound method are presented. Finally, the proposed method is applied to the IEEE39 buses test system and an actual power system in China. The simulating results indicate that the method needn't an exhaustive search for whole combination scheme, and can quickly find the optimal expand lines with the lowest investments and operation costs.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.N50577017).

Key words: transmission line expansion planning; planning set; branch and bound method

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)11-0060-07

0 引言

随着经济的迅速发展, 电力负荷也迅速地增长。当负荷增长接近输电网运行极限的同时, 事故率增加, 将严重影响电力系统的安全稳定运行。进行输电线扩展是增加输电容量的有效方法之一。在实际电力系统中, 规划者可以制定出多种输电线扩展规划方案, 每种方案的投建线路不同, 投资成本也不同。对不同的方案, 其投建后系统的运行成本也不同。

为了使投资和运行成本最小, 而又保证电网可靠性, 电力工作者尝试了很多优化技术对各种方案进行分析计算, 进而找到最优的电网规划方案。文

献[1-3]采用改进遗传算法来求解多目标电网规划问题, 能取得较好结果; 文献[4]提出了计算资源依搜索效率合理分配的全新概念, 并给出了多种群中心解搜索电网规划算法; 文献[5]提出了基于区间层次分析法的城网规划综合评判决策方法; 文献[6-7]将启发式算法混合使用来求解电网规划的最优方案; 文献[8]提出了一种基于风险度评估的配电网多目标灵活规划模型, 并采用改进生成树法进行求解; 文献[9-10]采用粒子群算法求解最优电网网架规划方案。这些算法大多数都是启发式算法。文献[11]采用基于分支定界的模糊集理论来求解输电线扩展规划问题。国外在研究电网规划问题时常用的方法还有塔布搜索法^[12]、Benders分解法^[13]、混合整数分离模型^[14]、改进遗传算法^[15]等。

本文提出了输电网规划集的概念, 利用分支定

基金项目: 国家自然科学基金项目(N50577017)

界法在规划集上研究了输电线扩展规划优化算法, 该方法的特点是不必对解空间进行遍历搜索就能够找到全局最优解。

1 输电线规划优化计算模型

1.1 规划集的概念

在电力系统规划过程中, 总是存在多种方案可以解决系统运行的安全性、可靠性和经济性问题。这些方案包括扩展输电线、建设变电站和电厂等。

实际电力系统的规模往往非常庞大, 规划人员在制定预选方案时很难找到最优的规划策略。为了对所有预选方案进行综合分析进而得到最优策略, 在优化计算过程中就必须同时考虑各种方案中涉及到的所有输电线、变电站和电厂等元素, 由此, 我们提出规划集的概念。

假设某电力系统规划问题有 n 种预选方案 A_i , $i=1, 2, \dots, n$, A_i 中涉及到的所有电力元件表示为 $E_i = \{e_1, e_2, \dots, e_{m_i}\}$, m_i 是 A_i 中涉及到的电力元件的个数。集合

$$\Sigma = \bigcup_{i=1}^n E_i = E_1 \cup E_2 \cup \dots \cup E_n$$

称作规划集。

规划集是由所有预选方案中的预投建、拆除或者更换的线路、变压器和发电厂还有其他电力元件构成的。这些元件对电力系统运行的安全性、可靠性和经济性都起着至关重要的作用, 合理地对这些元件进行规划能有效提高系统运行的可靠性和经济性, 这就需要通过优化算法对规划集中所有元素进行综合分析。优化分析得到的最优规划策略中涉及到的元件是规划集的一个新的子集, 是最优的规划方案。

对于输电线扩展规划来说, 预选方案中的每一条候选线路都存在两种状态: 投建和不投建。在优化计算模型中, 用二进制变量来表示候选线路的投建与否, 二进制变量的个数和规划集中元素的个数相同。

1.2 输电线扩展规划优化数学模型

输电线扩展规划优化数学模型如下:

$$\min \{C = \sum_{j=1}^{N_g} \sum_{g=1}^{N_g} h_j C_{Fgr} C_{Ggt} + \sum_{t=1}^{N_y} \sum_{b=1}^{N_c} \beta_t q_{bt} C_{Lbt}\} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad P_{sit} - U_{it} \sum_{j=1}^{N_b} U_{jt} [(G_{ij}^e + \sum_{\tau=1}^t \sum_{b \in B_{ij}} q_{b\tau} G_b^c) \cos \theta_{ijt} + (B_{ij}^e + \sum_{\tau=1}^t \sum_{b \in B_{ij}} q_{b\tau} B_b^c) \sin \theta_{ijt}] = 0 \quad (2)$$

$$Q_{sit} - U_{it} \sum_{j=1}^{N_b} U_{jt} [(G_{ij}^e + \sum_{\tau=1}^t \sum_{b \in B_{ij}} q_{b\tau} G_b^c) \sin \theta_{ijt} -$$

$$(B_{ij}^e + \sum_{\tau=1}^t \sum_{b \in B_{ij}} q_{b\tau} B_b^c) \cos \theta_{ijt}] = 0 \quad (3)$$

$$P_{Gg} \leq P_{Ggt} \leq \bar{P}_{Gg} \quad (4)$$

$$Q_{Gg} \leq Q_{Ggt} \leq \bar{Q}_{Gg} \quad (5)$$

$$U_{it} \leq U_{it} \leq \bar{U}_i \quad (6)$$

$$P_{jt}^e \leq P_{jt}^e \leq \bar{P}_{jt}^e \quad (7)$$

$$P_b^c \leq P_{bt}^c \leq \bar{P}_b^c, \quad q_{bt} \neq 0 \quad (8)$$

$$0 \leq \sum_{t=1}^{N_y} q_{bt} \leq 1 \quad (9)$$

其中: $C_{Ggt} = a_{2g} P_{Ggt}^2 + a_{1g} P_{Ggt} + a_{0g}$; $P_{ijt}^e = U_{it}^2 G_{ij}^e - U_{it} U_{jt} \cdot (G_{ij}^e \cos \theta_{ijt} + B_{ij}^e \sin \theta_{ijt})$; $P_{bt}^c = U_{it}^2 G_b^c - U_{it} U_{jt} (G_b^c \cos \theta_{ijt} + B_b^c \sin \theta_{ijt})$, $b \in B_{ij}$, $q_{bt} \in \Sigma$, ($t=1, 2, \dots, N_y$); N_y 是规划期的年数; N_g 是发电机的个数; h_j 是一年内的小时数, 值为 8760 h/年; C_{Fgr} 和 C_{Ggt} 分别是发电机 g 在第 t 时的燃料价格和耗量特性, C_{Ggt} 的单位是吨/年; N_c 是规划集中候选投建线路的个数; β_t 是输电线投建后第 t 年折旧费; $q_{bt} \in \Sigma$ 是二进制变量, $q_{bt}=1$ 表示第 b 条候选线路在第 t 年进行投建, 0 表示不投建; C_{Lbt} 是候选线路 b 在第 t 年投建的费用; P_{sit} 和 Q_{sit} 分别是第 t 年注入节点 i 的有功和无功功率; U_{it} 是节点 i 在第 t 年的电压幅值; N_b 是节点个数; G_{ij}^e 和 B_{ij}^e 是由已有线路形成的节点导纳矩阵中的元素; G_b^c 和 B_b^c 是候选线路 b 的形成的节点导纳矩阵中的元素; $b \in B_{ij}$ 表示第 b 条候选线路连接节点 i 和节点 j ; $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ 是节点 i 和节点 j 之间的相角差; Σ 是规划集。

输电线扩展规划的目标函数为发电机的发电成本和候选线路的投资成本。候选线路的投建能够有效改变系统潮流的分布, 在保证电压、功率和频率不越界的前提下, 使发电成本低的机组优先发电, 从而降低系统运行成本; 而投建大量的候选线路会增加投资成本, 这就需要平衡运行成本和投资成本, 找到一个经济性最优的输电线扩展规划方案。

等式 (2) 和等式 (3) 是潮流约束; 不等式 (4) ~ (7) 分别是发电机的有功和无功出力极限约束、节点电压上下限约束和输电线有功潮流极限约束; 不等式 (8) 是候选线路的有功潮流极限约束; 不等式 (9) 是候选线路一次性投建约束。

上述模型中, 二进制变量 q_{bt} 只影响潮流的分布和运行效益, 对流过预选线路潮流的不等式约束没有影响, 因此, 只有目标函数和等式约束中才含有 q_{bt} , 不等式约束 (8) 中则不含 q_{bt} 。

2 输电线扩展规划分支定界算法

2.1 基本思想

输电线扩展规划分支定界算法是以“松弛”、“分支”、“定界”、“剪枝”为基础的。基本思想是：首先，将表示候选线路投建与否的二进制变量 q_{br} 在 0~1 区间连续化，形成松弛问题，即松弛化；其次，分别研究某条线路在投建和不投建两种情况下系统运行成本和投资费用之和的最小值问题，即分支；然后，将运行成本和投资成本之和的最小值作为这两种情况的下界，即定界；最后，对于无法得到全局最优解的情况不做进一步分支和定界，即剪枝。迭代上述过程，直到得到全局最优的规划方案时结束。

2.2 分支定界法 (Branch and Bound, B&B)

分支定界法的模型如下：

$$\begin{aligned} \text{P:} \quad & \min f(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = 0 \\ & \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \leq 0 \\ & q_i \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

设置初始上界 $U = +\infty$ ，将二进制变量连续化得到下列松弛问题 P0。

$$\begin{aligned} \text{P0:} \quad & \min f(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = 0 \\ & \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \leq 0 \\ & 0 \leq q \leq 1 \end{aligned}$$

用内点法求解 P0 得到最优解 $\mathbf{x}_0^*, \mathbf{q}_0^*$ 以及下界值 $L_0 = f(\mathbf{x}_0^*, \mathbf{q}_0^*)$ 。选择满足下列条件的变量 q_i 作为分支变量：

$$q_i = \min \{ |q_i^* - 0.5| \}, q_i^* \in \mathbf{q}_0^*$$

将分支变量分别置为 0 和 1 得到下列两个松弛子问题：

$$\begin{aligned} \text{P1:} \quad & \min f(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = 0 \\ & \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \leq 0 \\ & 0 \leq q \leq 1 \\ & q_i = 0 \\ \text{P2:} \quad & \min f(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = 0 \\ & \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \leq 0 \\ & 0 \leq q \leq 1 \\ & q_i = 1 \end{aligned}$$

用内点法对松弛子问题 P1 和 P2 进行求解，得到最优解 $\mathbf{x}_1^*, \mathbf{q}_1^*$ ， $\mathbf{x}_2^*, \mathbf{q}_2^*$ 以及下界值 $L_1 = f(\mathbf{x}_1^*, \mathbf{q}_1^*)$ ，

$L_2 = f(\mathbf{x}_2^*, \mathbf{q}_2^*)$ 。如果 \mathbf{q}_1^* 或者 \mathbf{q}_2^* 是整数解并且下界值小于上界值 U ，我们就将这个整数解对应的目标函数值作为上界 U 。否则，我们选择子问题 P1 和 P2 中下界值较小的进行分支。上述过程进行迭代，直到分支子问题的下界值大于或等于上界 U 时，迭代结束。

在上述迭代过程中，遇到下列条件之一则对子问题进行剪枝：

- (a) 无解；
- (b) 最优解为整数可行解；
- (c) 下界值小于或等于上界值。

3 输电线扩展规划分支定界法的计算步骤

根据上节的规划计算模型，下面给出了详细的输电线扩展规划分支定界算法的计算步骤。

第一步：初始化。置迭代次数 $k = 1$ ，初始上界 $U = +\infty$ 。将问题 (1) ~ (9) 松弛化得到松弛问题 P0，用内点法求解 P0 得到最优解 \mathbf{q}_0^* 和下界值 L_0 。如果 \mathbf{q}_0^* 是整数解，那么 \mathbf{q}_0^* 就是全局最优解，如果 P0 无解则程序结束，否则执行第五步。

第二步：选择分支子问题。在未进行剪枝的子问题中选择下界值最小的子问题进行分支，记作 P_i ，执行第三步。如果所有子问题都剪枝，那么迭代结束，执行第四步。

第三步：判断是否满足终止条件。如果分支子问题 P_i 的下界值满足条件： $U \leq L_i$ ，迭代结束，执行第四步，否则执行第五步。

第四步：当前上界值对应的整数解就是问题 (1) ~ (9) 的全局最优解，程序停止。

第五步：选择分支变量。选择满足下列条件的二进制变量作为分支变量： $\min(|q_i^* - 0.5|)$ ，记作 q_j 。分别将 q_j 置成 0 和 1 得到两个新的子问题 P2k-1 和 P2k，执行第六步。

第六步：求解新形成的子问题。用内点法对新形成的子问题 P2k-1 和 P2k 进行求解，得到最优解 \mathbf{q}_{2k-1}^* 和 \mathbf{q}_{2k}^* 以及下界值 L_{2k-1} 和 L_{2k} 。置 $k = k + 1$ 。

第七步：更新上界值。如果新形成的子问题有整数最优解并且下界值小于当前上界值 U ，则将 U 更新为这个子问题的下界值。

第八步：剪枝。如果新形成的子问题满足剪枝条件，则进行剪枝，然后执行第二步。

4 算例分析

4.1 算例 1

将所提出的算法应用到 IEEE39 节点测试系统

来分析优化计算过程。如图 1 所示。

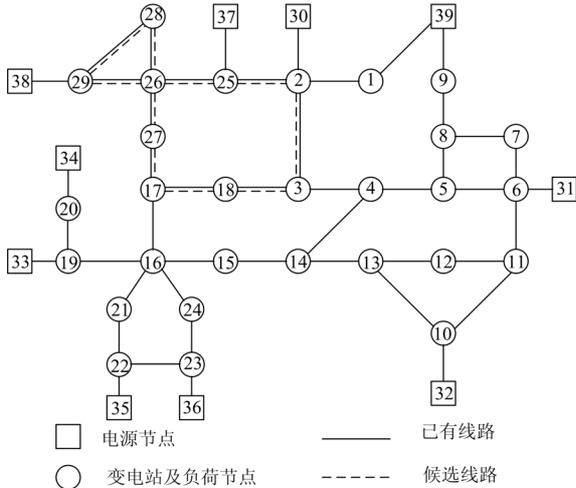


图 1 算例 1 测试系统网络结构

Fig.1 Case 1 testing system network

测试系统的节点 3、18、26、27、28 的负荷将以每年 3% 的速度增长, 达到线路传输极限, 对网络进行两年规划, 年折旧率为 0.8。电源 31、32、36 投建较早, 发电成本高于其他电源, 各电源有功出力极限见表 1, 节点 3、18、26、27、28 的当前负荷见表 2。

表 1 各电源有功出力极限

Tab.1 Power limit of each source

电源	极限 / MW	电源	极限 / MW
30	350	35	1 000
31	1 145	36	660
32	750	37	640
33	732	38	930
34	808	39	1 100

表 2 负荷增长点的当前负荷值

Tab.2 Loads of load growing point

节点	3	18	26	27	28
负荷 / MW	322	158	139	281	206

输电线扩展规划有三种预选方案 A_1, A_2, A_3 。

A_1 : 在支路 2-3、2-25、26-27、26-29、28-29 分别增加一条输电线;

A_2 : 在支路 2-3、2-25、25-26、26-27、28-29 分别增加一条输电线;

A_3 : 在支路 3-18、17-18、17-27、25-26、26-28 分别增加一条输电线。

这三种方案中分别涉及到的候选线路的集合为:

$$E_1 = \{l_{2-23}, l_{2-25}, l_{26-27}, l_{26-29}, l_{28-29}\};$$

$$E_2 = \{l_{2-23}, l_{2-25}, l_{25-26}, l_{26-27}, l_{28-29}\};$$

$$E_3 = \{l_{3-18}, l_{17-18}, l_{17-27}, l_{25-26}, l_{26-28}\}。$$

则规划集 $\Sigma = E_1 \cup E_2 \cup E_3 = \{l_{2-3}, l_{2-25}, l_{3-18}, l_{17-18}, l_{17-27}, l_{25-26}, l_{26-27}, l_{26-28}, l_{26-29}, l_{28-29}\}。$

规划集中候选线路的传输功率极限及投建费用见表 3, 其他线路功率均未达到极限。

表 3 候选线路功率传输极限及投建费用

Tab.3 Limits and costs of candidate lines

线路	极限 / MW	费用 / 百万元
2-3	330	1.5
2-25	200	4
3-18	200	1.3
17-18	200	0.7
17-27	200	1.5
25-26	200	2
26-27	200	1.4
26-28	200	3.1
26-29	200	4.5
28-29	200	1.4

采用输电线扩展规划分支定界算法进行求解, 各条候选线路的分支过程见图 2, 图 2 中每一个子问题的下界值见表 4。

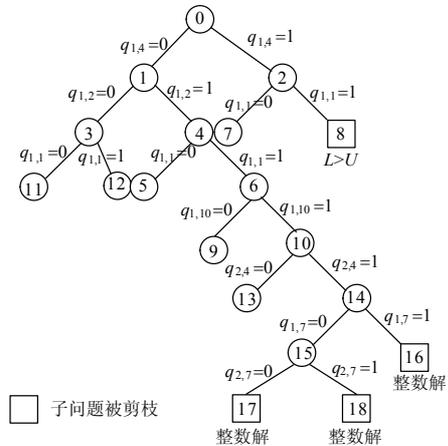


图 2 算例 1 分支定界过程

Fig.2 Branch and bound process in case 1

由图 2 可见, 对二进制变量进行 9 次分支, 输电线扩展规划分支定界算法满足了终止条件。分支过程中, 子问题 16 首先得到整数解, 进行剪枝, 并且将子问题 16 的下界值作为当前的上界 U , 即 $U = 208\ 058.878\ 95$; 随后子问题 17 和子问题 18 也得到整数可行解, 其下界值分别为 $206\ 787.832\ 22$ 和 $207\ 486.839\ 12$; 子问题 17 的下界值小于当前上界值 U , 则将 U 更新为 $206\ 787.832\ 22$; 子问题 18

的下界值则大于当前上界值 U ，进行剪枝；然后选择分支子问题，在所有未进行分支且未剪枝的子问题中，子问题 8 的下界值是最小的，因此将子问题 8 作为分支子问题，但是子问题 8 的下界值为 206 809.466 31，大于当前上界值 206 787.832 22，满足了分支定界法的终止条件。此时上界值 U 对应的子问题为 17，则子问题 17 的最优整数可行解就是初始问题的最优解。

表 4 算例 1 各子问题下界

Tab.4 Lower bound of each sub-problem in case 1

子问题	下界值	子问题	下界值
0	205 586.815 67	10	206 648.391 43
1	205 704.078 63	11	208 358.919 10
2	206 048.938 00	12	207 645.090 95
3	206 488.726 21	13	208 582.193 75
4	205 917.914 07	14	206 735.638 42
5	208 910.699 99	15	206 758.701 60
6	206 463.441 51	16	208 058.878 95
7	207 071.941 40	17	206 787.832 22
8	206 809.466 31	18	207 486.839 12
9	208 107.112 94		

优化计算的结果：规划期第一年投建候选线路 2-3、2-25、28-29，第二年投建线路 17-18，系统在这两年期间的运行成本和线路投资总共为 2 067.878 3 亿元。在规划期第一年中，由于负荷点 3 和 28 功率相对较大，负荷增长 3%后系统无法满足运行条件。投建线路 2-3 表明节点 3 的负荷主要由电源 30 和 37 提供；候选线路 28-29 的投建表明节点 28 的负荷功率主要由电源 38 提供；电源 37 的功率输出的路径只有 2-25 和 25-26，这两条线路的功率传输极限都为 200 MW，而电源 37 的出力极限为 640 MW，候选线路 2-25 的投建能够增大电源 37 的输出功率，虽然候选线路 2-25 的投建成本很高，但是电源 37 的发电成本较低，长时期内系统总的运行成本会降低。在规划期第二年中，系统无法满足负荷点 18 的持续增长，由于节点 16 连接着四个电源点，其中电源 33、34、35 发电成本较低且出力极限较高，是主力电源点，负荷点 18 的功率主要通过线路 17-18 进行传输，因此需要对线路 17-18 进行扩展。

算例中，优化计算结果与三个预选方案都不同，是规划集的一个新的子集。这说明规划人员在对大规模电网进行规划时，很难凭经验得到最优方案，而通过规划集我们就可以得到比任何预选方案都更优的规划策略，可见规划集在寻找电网规划的最优

策略中起着重要作用。

4.2 算例 2

将所提出的算法应用到某实际地区电网中来分析优化计算过程，如图 3 所示。该地区电网的东北部区域为新兴工业城市，负荷增长迅速。负荷点 14、16 和 17 以每年 3% 的速度增长，达到线路运行极限，对网络进行两年规划，折旧率为 0.8。

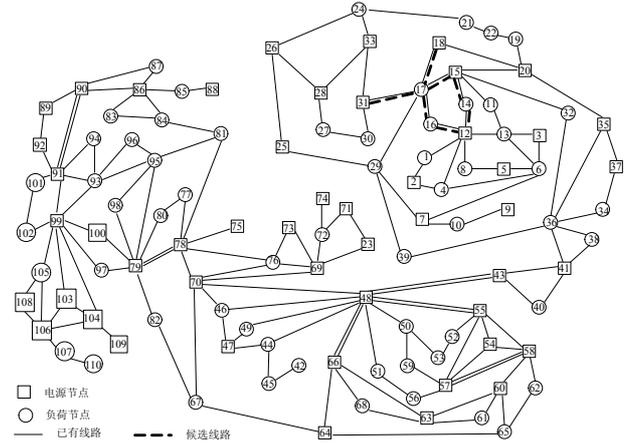


图 3 算例 2 网络结构

Fig.3 Case 2 network

输电线扩展规划有 4 种预选方案 A_1, A_2, A_3, A_4 。

A_1 ：在支路 12-14、15-17、16-17 分别增加一条输电线；

A_2 ：在支路 12-16、14-15、17-18 分别增加一条输电线；

A_3 ：在支路 14-15、15-17、17-31 分别增加一条输电线；

A_4 ：在支路 12-14、12-16、15-17 分别增加一条输电线。

这 4 种方案中分别涉及到的候选线路的集合为：

$$E_1 = \{l_{12-14}, l_{15-17}, l_{16-17}\};$$

$$E_2 = \{l_{12-16}, l_{14-15}, l_{17-18}\};$$

$$E_3 = \{l_{14-15}, l_{15-17}, l_{17-31}\};$$

$$E_4 = \{l_{12-14}, l_{12-16}, l_{15-17}\};$$

则规划集 $\Sigma = E_1 \cup E_2 \cup E_3 \cup E_4 = \{l_{12-14}, l_{12-16}, l_{14-15}, l_{15-17}, l_{16-17}, l_{17-18}, l_{17-31}\}$ 。

采用输电线扩展规划分支定界算法进行求解，各条候选线路的分支过程见图 4，图 4 中每一个子问题的下界值见表 5。

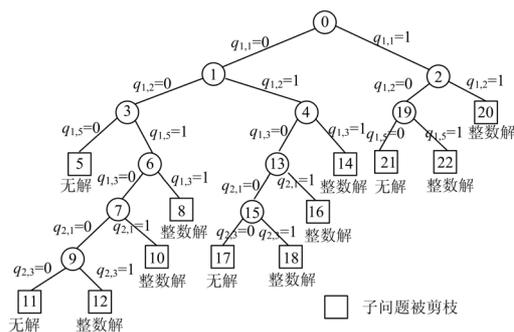


图 4 算例 2 分支定界过程

Fig.4 Branch and bound process in case 2

表 5 算例 1 各子问题下界

Tab.5 Lower bound of each sub-problem in case 2

子问题	下界值	子问题	下界值
0	1 214.718 54	12	1 253.898 86
1	1 220.530 13	13	1 233.243 26
2	1 243.815 77	14	1 266.424 22
3	1 222.974 57	15	1 234.726 18
4	1 231.910 99	16	1 251.635 97
5	无解	17	无解
6	1 229.168 31	18	1 255.770 58
7	1 230.369 68	19	1 247.350 75
8	1 265.622 28	20	1 259.841 50
9	1 231.524 45	21	无解
10	1 250.298 67	22	1 259.626 30
11	无解		

由图 4 可见, 对二进制变量进行了 11 次分支, 输电线扩展规划分支定界算法满足了终止条件。分支过程中, 子问题 5 首先出现了无解情况, 进行剪枝, 这说明第一年中如果候选线路 12-14、12-16 和 16-17 都不投建则无法满足负荷增长的需求; 子问题 8 首先得到整数解, 将子问题 8 对应的下界值 1 265.622 28 (表 5) 作为当前的上界, 并对子问题 8 进行剪枝; 此时, 子问题 7 在当前所有未进行剪枝的子问题中下界值最小, 进行分支, 得到子问题 9 和子问题 10; 子问题 10 有整数解, 并且下界值为 1 250.298 67, 小于当前上界, 因此将上界更新为 1 250.298 67; 在随后的分支定界过程中所有得到整数解的子问题的下界值都大于当前上界 1 250.298 67, 因此上界不进行更新, 直到所有子问题都被剪枝, 计算终止。当前上界对应子问题 10, 因此, 子问题 10 的解就是输电线扩展规划的最优解。

子问题 10 的最优解为 $q_{10}^* = \{0000100, 1000000\}$, 即第一年投建候选线路 16-17, 第二年投建候选线路 12-14。投建线路 16-17 说明节点 16 增

长的负荷需要通过电源 15、18 和 31 提供; 第二年投建线路 12-14 说明原有线路从第二年开始无法满足节点 14 的负荷增长, 节点 14 增加的负荷需要由电源 12 提供。

5 结论

文章提出了规划集的概念, 并通过此概念给出了输电线扩展规划分支定界算法。将此方法应用到 IEEE39 母线测试系统和实际某地区输电网的输电线扩展规划中, 结论表明本文给出的方法在处理大规模多阶段电网输电线扩展规划问题中是合理有效的; 通过规划集得到的规划策略优于任何预选方案; 内点法与分支定界法的结合使用能够找到输电线扩展规划问题的最优策略, 并且计算量明显减小。

未来研究工作: 将规划集的概念及分支定界法应用到更广泛的电力系统规划问题中, 例如线路的更换和检修, 增加新的变电站或电源, 电容器组的投建等。

参考文献

- [1] 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 Hao-zhong, GAO Ci-wei, MA Ze-liang, et al. The lexicographically stratified method for multi-object optimal electric power network planning [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (10): 11-16.
- [2] 叶在福, 单渊达. 基于边界搜索策略的遗传算法在电网扩展规划中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (11): 41-45.
YE Zai-fu, SHAN Yuan-da. A new transmission network expansion planning using improved genetic algorithm based borderling search strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (11): 41-45.
- [3] 叶在福, 单渊达. 多种群遗传算法在电网扩展规划中应用的改进[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11 (5-6): 55-61.
YE Zai-fu, SHAN Yuan-da. A new transmission network expansion planning using improved multiple-population genetic algorithm[J]. Proceedings of the EPSA, 1999, 11 (5-6): 55-61.
- [4] 高赐威, 程浩忠, 王旭. 基于计算资源效率分配的多种群中心解搜索电网规划算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (10): 8-14.
GAO Ci-wei, CHENG Hao-zhong, WANG Xu. Multi-population central solution searching algorithm based on computation resource distribution for electric network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (10): 8-14.
- [5] 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 Cheng-shan, ZHOU Min. An LAHP-based MADM method in urban power system planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (4): 50-57.

[6] 王春娟, 张伏生, 王帅, 等. 基于混合优化算法的电网规划方法[J]. 电网技术, 2005, 29 (23): 30-39.
 WANG Chun-juan, ZHANG Fu-sheng, WANG Shuai, et al. Power network planning method based on hybrid optimal algorithm[J]. Power System Technology, 2005, 29 (23): 30-39.

[7] 周玲, 王兴念, 丁晓群, 等. 基因/禁忌组合算法在配电网网架优化规划中的应用[J]. 电网技术, 1999, 23 (9): 35-42.
 ZHOU Ling, WANG Xing-nian, DING Xiao-qun, et al. Application of genetic algorithm/tabu search combination algorithm in distribution network structure planning[J]. Power System Technology, 1999, 23 (9): 35-42.

[8] 杨文字, 刘健, 余健明, 等. 基于风险度评价的配电网灵活规划[J]. 电工技术学报, 2005, 20 (8): 18-23.
 YANG Wen-yu, LIU Jian, YU Jian-ming, et al. Distribution network flexible planning based on risk assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20 (8): 18-23.

[9] 王志刚, 杨丽徙, 陈根永. 基于蚁群算法的配电网网架优化规划方法[J]. 电力系统及其自动化, 2002, 14 (6): 73-76.
 WANG Zhi-gang, YANG Li-xi, CHEN Gen-yong. Ant colony algorithm for distribution network planning[J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 14 (6): 73-76.

[10] 吴杰, 刘健, 卢志刚, 等. 适用于输电网网架规划的人工鱼群算法[J]. 电网技术, 2007, 31 (18): 63-67.

WU Jie, LIU Jian, LU Zhi-gang, et al. Artificial fish swarm algorithm suitable to transmission network planning[J]. Power System Technology, 2007, 31 (18): 63-67.

[11] Choi J, El-Keib A A, Tran T. A fuzzy branch and bound-based transmission system expansion planning for the highest satisfaction level of the decision maker[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1).

[12] Gallego R A, Romero R, Monticelli A J. Tabu search algorithm for network synthesis[J]. IEEE Trans on Power Syst, 2000, 15(2):490-495.

[13] Binato S, Pereira M V, Granville S. A new benders decomposition approach to solve power transmission network design problems[J]. IEEE Trans Power Syst, 2001, 16(2): 235-240.

[14] Bahiense L, Oliveira G C, Pereira M, et al. A mixed integer disjunctive model for transmission network expansion[J]. IEEE Trans Power Syst, 2001, 16(3): 560-565.

[15] Silva E L, Gil H A, Areiza L M. Transmission network expansion planning under an improved genetic algorithm[J]. IEEE Trans Power Syst, 2000, 15(3): 1168-1175.

收稿日期: 2009-08-05; 修回日期: 2009-11-04
 作者简介:

赵洪山 (1965-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统建模、混杂控制以及优化检修方面的研究和教学工作;
 E-mail: zhaohsh2002@yahoo.com.cn

陈亮 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统输电线路扩展规划研究。

(上接第 59 页 continued from page 59)

LIU Yao-nian, et al. A short-term load forecasting approach based on imposing sparseness upon LSSVM integrated SMO algorithms[J]. Relay, 2008, 36 (4): 63-66.

[12] 杨立成. 基于最小二乘支持向量机的短期电力负荷预测方法研究[D]. 南宁: 广西大学, 2008.
 YANG Li-cheng. Research on short-term electric load forecasting based on least squares support vector machine[D]. Nanning: Guangxi University, 2008.

[13] 王德意, 杨卓, 杨国清. 基于负荷混沌特性和最小二乘支持向量机的短期负荷预测[J]. 电网技术, 2008, 32 (7): 66-71.
 WANG De-yi, YANG Zhuo, YANG Guo-qing. Short-term load forecasting based on chaotic characteristic of loads and least squares support vector machines[J]. Power System Technology, 2008, 32 (7): 66-71.

[14] 廖向旗, 等. 基于灰色关联聚类的负荷特性分类[J]. 电

力科学与技术学报, 2007, 22 (2): 28-33.
 LIAO Xiang-qi, et al. Classification of substation load characteristics based on gray relevancy clustering[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2007, 22 (2): 28-33.

[15] 钱卫华, 等. 基于负荷特性分析的短期负荷预测相似日选择方法[J]. 华中电力, 2007, 20 (1): 17-21.
 QIAN Wei-hua, et al. The select similar days method for short-term load forecasting based on load characteristic analysis[J]. Central China Electric Power, 2007, 20 (1): 17-21.

收稿日期: 2009-07-25
 作者简介:

李光珍 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统负荷预测、电力系统智能调度; E-mail: 85lgz@163.com

刘文颖 (1955-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统智能调度、负荷预测、电力系统分析与控制。