

基于 Tabu搜索的配电网规划

陈根军¹, 李继光², 王磊¹, 唐国庆¹

(1. 东南大学电气工程系, 南京 210096; 2. 香港理工大学电机工程系, 香港)

摘要: 详细探讨了现代启发式方法家族中的一个新兴成员——Tabu搜索在配电网规划中的应用。首先,在同时考虑配电系统扩展的固定费用和与电能损失相关的变化费用的基础上对配电网规划问题进行了描述,并建立了相应的数学模型。其次,详细探讨了基于Tabu搜索的配电网规划问题。最后,将文中提出的方法在一具有6个变电站、98条馈线段的试验网络上进行了测试。结果表明,所提出的方法是有效、可行的。

关键词: 配电网规划; 启发式方法; Tabu搜索; 组合优化

中图分类号: TM 715; TP 18

0 引言

配电网规划涉及新建变电站和馈线段建设时间、建设地点和容量大小的最优选择,以满足负荷增长的需求,同时服从变电站容量、馈线段容量、电压降落、网络结构以及可靠性要求等约束,因此,配电网规划是一个非常复杂的大规模组合优化问题。传统的数学规划方法^[1]对目标函数或问题约束做了相应的近似。即使某个方法的数学模型相对比较完整,却相当费时。近年来,应用现代启发式方法^[2,3](如 SA, GA)求解大量组合优化问题,已被证明是非常有效的。本文详细探讨了现代启发式方法家族中另一个新兴成员——Tabu搜索在配电网规划中的应用。Tabu搜索是一种通用的启发式最优技术,在许多领域已经取得了令人瞩目的成功^[4-9]。

1 配电网规划问题的数学描述

配电网规划的目标是使配电网扩展的固定费用和与电能损失相关的变化费用最小,同时服从变电站容量大小、馈线段容量大小、电压降落、放射性网络结构以及可靠性要求等约束。由于目标函数和约束均具有非线性特征,配电网规划是一个大规模动态非线性混合整数规划问题。在本文中,配电网规划用下述模型来描述:

$$\min \left\{ Z = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in S_E} X_{itE}^S (P_{itE}^S)^2 + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in S_P} [Y_{itP}^S C_{itP}^S + X_{itP}^S (P_{itP}^S)^2] + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in F_E} X_{itE}^F (P_{itE}^F)^2 + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in F_P} [Y_{itP}^F C_{itP}^F + X_{itP}^F (P_{itP}^F)^2] \right\} \quad (1)$$

式中 T 是规划时间范围的长度; S_E 是已存在变电站的集合; S_P 是可能的待建变电站的集合; F_E 是已存在馈线段的集合; F_P 是可能的待建馈线段的集合; X_{itE}^S 是已存在变电站 i 在 t 时间段的能量损失费用系数; X_{itP}^S 是可能的待建变电站 i 在 t 时间段的能量损失费用系数; X_{itE}^F 是已存在馈线段 i 在 t 时间段的能量损失费用系数; X_{itP}^F 是可能的待建馈线段 i 在 t 时间段的能量损失费用系数; 如果变电站 i 在 t 时间段被建设,则 $Y_{itP}^S = 1$, 否则, $Y_{itP}^S = 0$; 如果馈线段 i 在 t 时间段被建设,则 $Y_{itP}^F = 1$, 否则, $Y_{itP}^F = 0$; C_{itP}^S 是 t 时间段建设变电站 i 折算到当前年的固定费用; C_{itP}^F 是 t 时间段建设馈线段 i 折算到当前年的固定费用; P_{itE}^S 是 t 时间段已存在变电站 i 供应的潮流; P_{itP}^S 是 t 时间段可能的待建变电站 i 供应的潮流; P_{itE}^F 是 t 时间段流过已存在馈线段 i 的潮流; P_{itP}^F 是 t 时间段流过可能的待建馈线段 i 的潮流。

它服从下列约束:

a. 潮流约束:

$$AP_t = D_t \quad (2)$$

式中 A 是 t 时间段的节点弧关联矩阵; P_t 是 t 时间段的网络潮流矢量; D_t 是 t 时间段的负荷需求矢量; $t = 1, 2, \dots, T$

b. 容量约束:

$$P_i \leq P_i^{\max} \quad (3)$$

式中 $i \in S_E \cup S_P \cup F_E \cup F_P$; $t = 1, 2, \dots, T$

c. 电压降落约束:

$$V_{\max} \geq V_{it} \geq V_{\min} \quad (4)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, N$, N 为节点数; $t = 1, 2, \dots, T$

d. 放射性约束

e. 逻辑约束

如果 $T=1$,上述模型就是一个单阶段的配电网规划问题。本文仅考虑单阶段的配电网规划问题,它可以拓展到多阶段的配电网规划。

2 Tabu搜索

Tabu搜索(TS)是一项通用的内启发式最优技术,用于求解大规模的组合最优问题。它通过利用灵活记忆的特殊形式,来避免搜索陷入局部最优。TS中的基本概念主要由“邻居”(neighborhood)和“保留期”(tenure)组成。通常,TS方法从一初始解开始搜索。初始解可以通过随机方法产生或由已有的启发式方法产生。通过应用操作符“移动”(move),对当前解进行操作,产生一组当前解的邻居试验解。在产生的这些邻居试验解中,最能改善评价函数的那个解被选择为新的当前最优解。如果所有的“移动”均不能改善评价函数,表明当前的解为局部最优解。为了防止陷入局部最优,在TS中还设置了一指定长度的Tabu表(称为Tabu list),在Tabu表中保存了那些最近已经实现了的“移动”的反方向“移动”(称为Tabu“移动”),Tabu表在每次迭代中都进行更新。在产生新的“移动”时,Tabu表中的“移动”必须加以限制,因为它们会使搜索过程返回到已经访问过的搜索空间中去。重复TS的搜索过程,直到满足指定的停止规则。

3 基于 Tabu搜索的配电网规划

本文提出的基于Tabu搜索的配电网规划算法描述如下:

a. 通过建立配电网的最小生成树来形成配电网规划的初始解 $S^{initial}$,并计算 $S^{initial}$ 的评价函数。令当前解矢量 $S^{current} = S^{initial}$,最好解矢量 $S^{best} = S^{initial}$ 。初始化 Tabu表和释放水平函数 A 。设置迭代计数器 $K=0$ 。

b. 如果 K 等于预先设定的最大允许迭代次数 K_{max} ,那么输出 S^{best} 作为最终的规划方案;否则令 $K = K+1$,并转步骤 c。

c. 通过后面将要定义的 2种“移动”,作用于 $S^{current}$,生成 $S^{current}$ 的一个放射性试验解 S ,并计算对应该试验解的评价函数 $f(S)$ 。重复该过程,直到指定的邻居取样数 N_{max} 已经达到。

d. 如果 S^{best} 没有步骤 c 中产生的最好试验邻居解好,那么就用该最好的试验邻居解更新 S^{best} ,并同时更新释放水平函数 A ;否则转步骤 e。

e. 如果步骤 c 中产生的试验邻居解对应的“移动”不在 Tabu表中,或虽在 Tabu表中但已达到其

释放水平,那么用该试验邻居解更新 $S^{current}$ 。将产生该试验邻居解的“移动”的反方向“移动”存入 Tabu表中,同时更新 Tabu表,转步骤 b;如果产生该试验邻居解的对应“移动”在 Tabu表中还没有达到其释放水平,那么就检查下一个次优试验邻居解,并重复该过程。

3.1 变量表达设计

在应用现代启发式方法,如 SA和 GA,来求解配电网规划问题时,选择一种比较好的变量表达方法是非常重要的。这对基于 TS的配电网规划方法也一样。通常,所有可能的待建馈线段和待建变电站的位置被选择作为配电网规划问题的变量集合^[2,3]。但由于在迭代过程中大量不可行解的出现,选择这样的变量表达方法常常使配电网规划过程不是很有效,算法需要较长的时间才能达到比较满意的解^[2]。一个较好的变量表达方法能将配电网规划中的每一个试验解限制为放射性解,从而能有效地提高整个搜索过程的效率,减少规划时间。

本文采用了一种被称为向上节点(upward-node)的表达方法。在文献[10]中,该方法被用于求解电力系统的恢复规划问题。众所周知,在一个放射性配电网中,每一个负荷节点或中间节点都仅有一个向上节点,虽然它可能有几个向下节点。向上节点表达法选择所有可能的新负荷点的向上节点作为问题的变量集。也就是说,试验解矢量是由所有可能的新负荷点的向上节点所组成的。这里,负荷点的向上节点是指供应该节点电能的节点。向上节点的概念可以用图1来表示。图中,节点2,3,4的向上节点1,2,1分别对应变量的1,2,3,因此有 $S_1=1, S_2=2, S_3=1$ 。虽然采用这种表达方法并不能保证试验解所对应的网络一定是放射性网络,但却使试验解对应的网络有较高的概率成为放射性网络。本文在向上节点表达方法中加入了一概率化过程,从而限制每一试验解对应的网络都为放射性网络。

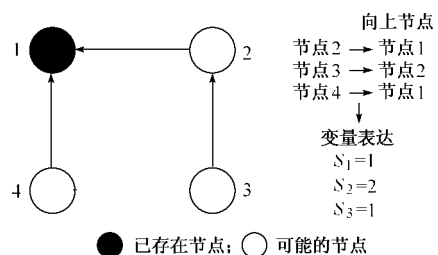


图 1 向上节点表达

Fig. 1 Upward-node expression

3.2 生成初始解

本文通过建立配电网的最小生成树来形成配

电网络规划的初始性网络 变电站节点被选为最小生成树的根节点 最小生成树的生成算法可以描述如下:

a. 定义两类节点集: S 由已连接节点和可能的变电站节点组成; S' 由非连接节点 (排除可能的新建变电站节点) 组成。

b. 连接集合 S' 与集合 S 中相距最近的两节点 称从 S' 中选中的节点为 W 将 W 从集合 S' 转移到集合 S

c. 重复步骤 b 直到集合 S' 中的所有节点均转移到集合 S 中。

3.3 “移动”及邻居设计

TS 实际上是一项有限制的邻居搜索技术。在搜索过程中, 每一个试验邻居解均通过“移动”操作从当前的子最优解中产生。为了实现“移动”操作, 可以采用多种方法^[4-9]。本文采用了两种“移动”方式: 单个“移动”和交换“移动”^[7], 分别描述如下。

3.3.1 单个“移动”

单个“移动”的过程如下:

a. $N = 0$

b. 如果 N 等于指定的邻居取样数 N_{max} , 则停止; 否则设置 $N = N + 1$, 转步骤 c

c. 随机产生一个整数来决定由当前解矢量生成试验邻居解的“移动”位置。记该位置为 P

d. 随机产生一个整数, 决定位置 P 的向上节点

e. 如果步骤 d 中选中的位置 P 的向上节点与当前解矢量中的向上节点相同, 转步骤 c; 否则转步骤 f

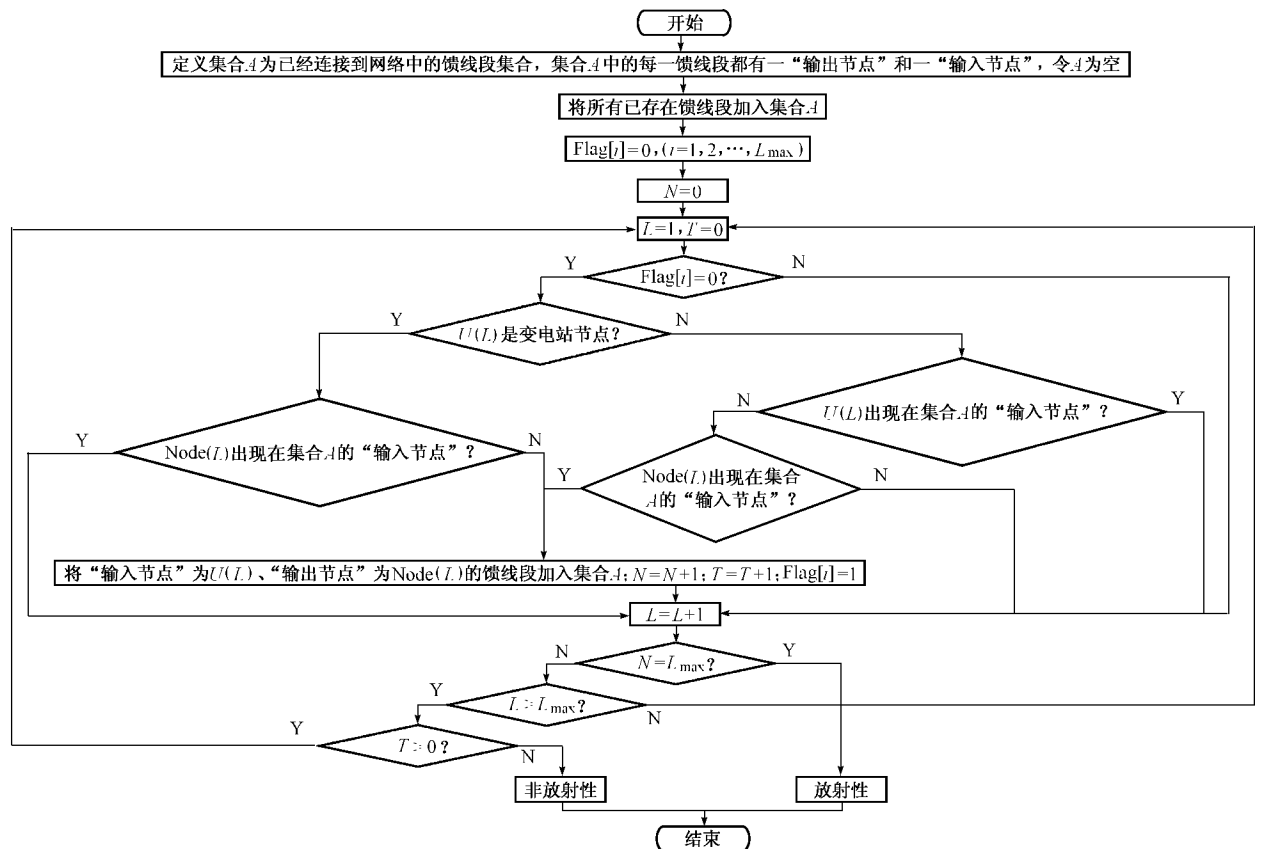
f. 通过改变位置 P 的向上节点产生一个试验邻居解

g. 检查步骤 f 中产生的试验邻居解的网络连通性。如果该试验邻居解对应的网络是一个放射状网络, 则转步骤 b, 否则转步骤 c

检查试验邻居解放射性连通性的过程可以用图 2 来表示

3.3.2 交换“移动”

交换“移动”同时改变当前解矢量 2 个位置的向



Node(L) 代表一节点, 它的向上节点为变量表达中的第 L 个元素; $U(L)$ 代表变量表达中的第 L 个元素; $Flag[i]$ 是用来控制流程的标志数组; L_{max} 是变量的最大数目

图 2 检查放射性连通性的流程图

Fig. 2 Flowchart of checking the radiality

上节点,所以它可以通过 2次单个“移动”来实现。

3.4 评价函数设计

为了在每一次迭代的 N_{\max} 个试验邻居解中选择最好的解,必须定义一评价函数来评估每一个试验邻居解。虽然这些试验邻居解均是放射性解,但不能保证它们都是可行解,这是因为它们有可能违反其他约束。这些约束包括变电站容量约束、馈线容量约束、电压降落约束等。很明显,当一个试验解为不可行解时,不能仅仅通过方程(1)中定义的费用函数 $Z(S)$ 来评价。为此定义了 3个其他的函数 $f_1(S)$, $f_2(S)$, $f_3(S)$, 并且有: 当变电站容量约束违反时,评价函数 $f(S) = f_1(S)$; 当馈线容量约束违反时,评价函数 $f(S) = f_2(S)$; 当电压降落约束违反时,评价函数 $f(S) = f_3(S)$; 当无约束违反时,评价函数 $f(S) = Z(S)$ 。

同时必须保证 $f_1(S) > f_2(S) > f_3(S) > Z_{\max}$ 成立。这里, Z_{\max} 代表费用函数的最大值。

3.5 Tabu表

为了防止算法返回到已经搜索过的空间中去,在 TS中设计了 Tabu表,用来保存已经执行过的“移动”的反方向“移动”。这些反方向“移动”又被称为 Tabu“移动”。在给定期限内,当形成试验解时,这些 Tabu“移动”被禁止执行。通过强加 Tabu“移动”,可以避免循环现象的产生,帮助搜索过程脱离局部最优。

Tabu表中允许存储 Tabu“移动”的最大个数称为 Tabu表的长度。在本文中,Tabu表的长度根据经验决定。每次迭代后,Tabu表均进行更新^[7]。也就是说,每次迭代后,新的 Tabu“移动”被加入 Tabu表中;而在 Tabu表中已保存的某个 Tabu“移动”,如果已经在 Tabu表中保留了 T_{\max} 次迭代,将被移出 Tabu表。其中, T_{\max} 被称为 Tabu保留期,是 TS 中一个非常重要的参数。

3.6 释放水平函数

为了防止某个有价值的“移动”因为处于 Tabu“移动”的状态而被限制执行,TS中设计了释放水平函数,用于释放那些有价值的“移动”。也就是说,如果某个 Tabu“移动”达到了释放水平,那么将不被限制,可以被选作为下一步“移动”的搜索方向。在本文中,释放水平函数被定义为到目前为止所发现的评价函数的最小值^[4]。如果一个 Tabu“移动”作用于当前解 S^{current} 产生的试验邻居解优于释放水平函数,那么该 Tabu“移动”达到了其释放水平。

4 算例分析

本文提出的方法经用 Microsoft Visual C++ 编程,在 Pentium Pro 200 M Hz 的计算机上进行了测试。采用的算例是一具有 6个变电站, 98条馈线

段的 10kV 配电系统,其网络接线图如图 3所示。限于篇幅,这里仅列出了系统的主要数据。表 1 给出了配电系统中各负荷点在规划期内必须满足的负荷需求数据。

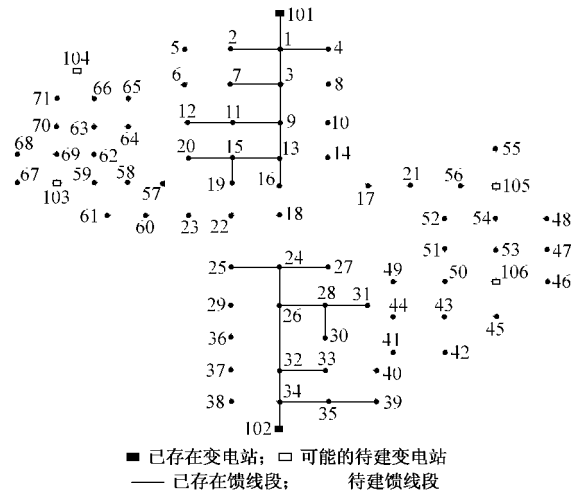


图 3 已存在配电系统及可能的扩展网络
Fig. 3 Existing distribution system and proposed new additions

表 1 各负荷点的负荷需求
Table 1 Load demands for all load points

kV A					
节点号	负荷需求	节点号	负荷需求	节点号	负荷需求
1	0	25	500	49	240
2	315	26	0	50	70
3	0	27	315	51	315
4	630	28	0	52	250
5	100	29	500	53	400
6	70	30	420	54	250
7	400	31	315	55	315
8	630	32	0	56	240
9	0	33	800	57	315
10	250	34	0	58	315
11	500	35	1 000	59	250
12	240	36	315	60	315
13	0	37	240	61	400
14	100	38	400	62	240
15	800	39	250	63	315
16	315	40	315	64	400
17	800	41	100	65	100
18	240	42	315	66	250
19	100	43	400	67	800
20	50	44	315	68	315
21	315	45	500	69	500
22	400	46	315	70	250
23	315	47	315	71	315
24	0	48	250		

可知变电站 103, 104, 105, 106 的费用分别为 3 000 万元、3 050 万元、3 150 万元和 3 200 万元。馈线费用为 1.5×10^5 元/km。最大允许电压降落为 5%。在本算例中, K_{\max} , N_{\max} 和 T_{\max} 分别取为 5 000,

30, 50 运行基于 TS 的配电网规划程序后,得到的最终规划方案如图 4 所示。

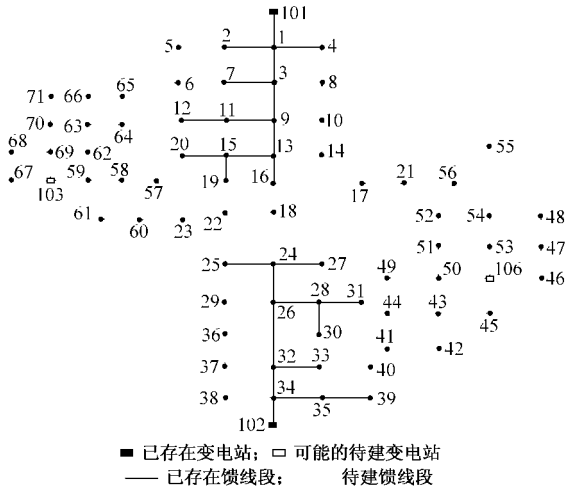


图 4 基于 TS 方法的最优规划方案

Fig. 4 Optimal planning scheme for the example system using TS-based method

5 结论

Tabu 搜索是一种非常有效的现代启发式方法,用于求解大规模的组合优化问题。本文详细探讨了 Tabu 搜索在单阶段配电网规划中的应用,将配电网规划问题描述为非线性混合整数规划问题,并建立了相应的数学模型和求解算法。算例分析表明,基于 Tabu 搜索的配电网规划方法是有效而且可行的。

参考文献

- 1 Khator S K, Leung L C. Power Distribution Planning: A Review of Models and Issues. *IEEE Trans on Power Systems*, 1997, 12(3): 115~1159
- 2 Miranda V, Ramito J V, Proenca L M. Genetic Algorithms in Optimal Multistage Distribution Network Planning. *IEEE Trans on Power Systems*, 1994, 9(4): 1927~1933

- 3 Ramirez-Rosado I J, Bernal-Agustin J L. Genetic Algorithms Applied to the Design of Large Power Distribution Systems. *IEEE Trans on Power Systems*, 1998, 13(2): 696~703
- 4 Yang H T, Huang Y C, Huang C L. Solution to Capacitor Placement Problem in a Radial Distribution System Using Tabu Search Method. In *Proceedings of 1995 International Conference on Energy Management and Power Delivery (EMPD 95)*. Singapore 1995. 388~393
- 5 Nara K, Hayashi Y, Yamafuji Y, et al. A Tabu Search Algorithm for Determining Distribution Tie Lines. In *Proceedings of 1996 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems (ISAP 96)*. Orlando (USA): 1996. 226~270
- 6 Kim H, Hayashi Y, Nara K. An Algorithm for Thermal Unit Maintenance Scheduling Through Combined Use of GA SA and TS. *IEEE Trans on Power Systems*, 1997, 12(1): 329~335
- 7 Wen F S, Chang C S. Tabu Search Approach to Alarm Processing in Power Systems. *IEE Proc-C*, 1997, 144(1): 31~38
- 8 Mori H, Hayashim T. New Parallel Tabu Search for Voltage and Reactive Power Control in Power Systems. In *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. Monterey (California): 1998. 43~434
- 9 Wen F S, Chang C S. Tabu Search Based Approach to Trouble Call Analysis. *IEE Proc-C*, 1998, 145(6): 731~738
- 10 Oyama T. Restorative Planning of Power System Using Genetic Algorithm with Branch Exchange Method. In *Proceedings of Intelligent Systems Applications to Power Systems*. Orlando (Florida): 1996

陈根军,男,博士研究生,研究方向为电力系统规划、配网自动化

李继洸,男,副教授,从事电力系统继电保护及电力系统谐波的研究和教学工作。

王磊,女,副教授,从事配网规划与配网自动化,人工智能、决策支持系统在电力系统中应用的研究。

DISTRIBUTION SYSTEM PLANNING BY TABU SEARCH APPROACH

Chen Genjun¹, K. K. Li², Wang Lei¹, Tang Guoqing¹

(1. Southeast University, Nanjing 210096, China)

(2. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract The application of the modern heuristic method, Tabu search, to distribution system planning is presented. Firstly the problem of distribution system planning is formulated considering both the fixed costs of distribution system expansion and the variable non-linear costs associated with the power losses. The new TS-based method for distribution system planning is then described in detail. Finally, a sample distribution system with 6 substations and 98 feeders is studied, which demonstrates the feasibility and efficiency of the proposed method.

Keywords distribution system planning; heuristic method; Tabu search (TS); combinatorial optimization