

# 基于灰色关联度算法的配电网降损决策

孙毅卫<sup>1</sup> 沈天时<sup>2</sup> 刘崇新<sup>2</sup> 孙振权<sup>1</sup> 张择策<sup>2</sup>

(1. 陕西省地方电力集团有限公司 陕西 西安 710061; 2. 西安交通大学电气学院 陕西 西安 710049)

**摘要:** 配电网线损分析与降损措施的研究一直是配电系统的一个重要研究课题。针对现在城镇中低压配电网降损措施难以选择的情况,研究了配电网降损规划的步骤,对线路电阻、变压器、功率因数和三相不平衡的影响程度进行灰色关联度理论分析,建立了基于影响程度评估结果的降损规划决策数学模型。从降损成本、降损经济效益、改造方案的可靠性、可实施性以及环境保护方面,对备选的方案进行比较选择,首次提出应用禁忌搜索算法对其进行寻优以提高效率,并通过实例进行分析和仿真验证,其研究结果证明了所提出的方法具有良好的可操作性和经济性,对现在的配电网改造具有重要的理论参考和实用意义。

**关键词:** 中低压配电网; 禁忌搜索算法; 灰色关联法; 降损规划

**Abstract:** Factors of line loss rate are varied, and under different circumstances, the degree of influence of each factor is different. Each type of loss reduction measures for distribution network contains a variety of alternative embodiments. Aiming at the difficult choice of measures in line loss reduction of distribution network, the steps of grid loss reduction planning are studied, the degree of influence of line resistance, transformer and power factor are analyzed with grey correlation method, and the mathematical model is established based on valuation results. In terms of loss reduction costs, economic benefits, reliability, enforceability and environmental protection, the alternative measures are compared, and it is proposed for the first time to apply Tabu search to big-scale alternative methods for high solution efficiency. The proposed method has a good economy and operability, and it has a certain reference value for the enhancement of the current distribution network.

**Key words:** medium-voltage and low-voltage distribution network; Tabu search; grey correlation method; loss reduction planning

中图分类号: TM73 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)04-0024-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.04.005

## 0 引言

由于环境和资源的压力,配电网正在往低碳高效的方向发展。中国的平均线损率相对国外偏高,很多地方都存在配电网架构薄弱、电网老化的问题,发展智能配电网显得尤其重要<sup>[1]</sup>。线损率是国家考核供电企业的重要技术指标,这项指标牵动着电网的发、供、变、用等各环节的运行情况,是企业管理水平的综合反应,也与企业的经济效益直接挂钩。线路损耗主要分成3个部分:可变损耗、固定损耗与管理损耗。这里讨论的损耗主要是可变损耗和固定损耗,也可以统称为技术损耗。

目前对配电网的低碳降损研究有很多,文献[2]从负荷率的角度出发,分析储能技术、分布式能源等对电网线损率的影响。文献[3]总结了近年来

主动配电网的相关研究成果,包括电压管理、电动汽车的管理、需求侧的管理以及各级政府统筹规划等措施。文献[4]结合主动配电网可控元素复杂多样性以及控制结构灵活多变的特点提出了主动配电网电压分层协调控制策略。虽然相关的研究很多,但是很少有对具体措施进行分析和定量计算的。下面基于改进的等值电阻法计算线损率,并采用灰色关联法寻找最大影响因素,然后建立了一种基于影响程度评估结果的降损规划决策模型,从多个方面对备选方案进行比较和选择。

## 1 禁忌搜索算法简介

Fred Glover于1977年提出了一种全局逐步寻优的算法:禁忌搜索算法(tabu search, TS)。禁忌搜索的特点在于算法本身具有灵活的记忆功能和特设

准则,使得算法在求解的过程中可以接受劣解,具有较强的爬山能力,避免迂回搜索。灵活的存储结构、禁忌准则以及特赦准则可以确保有效搜索多样化,获得全局最优解。

TS算法包含禁忌对象、禁忌长度、领域函数、候选解、特赦准则等参数。禁忌搜索的算法步骤如下:

- 1) 预先设定算法参数,确定初始解  $x$ ,将禁忌表设置为空。
- 2) 判断是否满足终止条件:如果满足结束搜索条件,当前解就作为优化结果输出;否则继续迭代,进行下一步。
- 3) 生成当前解的邻域解,确定下一步寻优范围的候选解集合。
- 4) 对候选解集合判断期望水平是否满足特赦准则:如果满足,则用满足特赦准则的候选解集中的最佳解替换当前的状态  $x$  成为新的当前解,并且换掉最先进入禁忌表的禁忌对象,同时更新历史最优解,然后转到步骤2);否则继续以下步骤。
- 5) 判断各个候选解是否在禁忌表中,选择其中非禁忌对象的最佳状态为新的当前解,并用与之相应的禁忌对象替换最早进入表的对象。
- 6) 转到步骤2)。

## 2 灰色关联度分析

灰色关联分析法是一种多因素分析方法,其基本原理是通过统计序列几何关系的比较来分清系统中多因素间关系的紧密程度,并可以根据各个参考因素与主因素间的关联度大小排序,判断参考因素对主因素的影响程度强弱。

针对由多个配电网场景生成的  $n_{sa}$  个分析场景(即样本点),将线损率指标作为灰色关联分析的主因素,功率因数指标、变压器容量指标、线路电阻指标以及三相不平衡度作为灰色关联分析参考因素,建立主因素序列  $A$  以及参考因素序列如下:

$$\begin{aligned} A &= [a(1) \ a(2) \ \dots \ a(n_{sa})] \\ B_{\phi} &= [b_{\phi}(1) \ b_{\phi}(2) \ \dots \ b_{\phi}(n_{sa})] \\ B_t &= [b_t(1) \ b_t(2) \ \dots \ b_t(n_{sa})] \\ B_w &= [b_w(1) \ b_w(2) \ \dots \ b_w(n_{sa})] \end{aligned} \quad (1)$$

式中的序列分别对应功率因数、变压器铁损、线路电阻和三相不平衡度构成的指标序列。

对各个序列的数据进行初始化。以主因素序列

$A$  为例:

$$A' = [a'(1) \ a'(2) \ \dots \ a'(n_{sa})] \quad (2)$$

$$a'(k) = \frac{a(k) - \min a(k)}{\max a(k) - \min a(k)} \quad (k = \Phi, t, w) \quad (3)$$

将初始化之后的序列与主序列的差序列记为  $\Delta_i$ 。并在差序列的基础上找出两极差。

$$\begin{aligned} \Delta_{\max} &= \max_i \max_k \Delta_i(k) \\ \Delta_{\min} &= \min_i \min_k \Delta_i(k) \end{aligned} \quad (4)$$

再求出参考因数序列和主因数序列之间的关联系数:

$$r_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_i(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad (5)$$

计算得到的序列间的灰色关联度表征了不同损耗影响因素对中低压配电网技术损耗的关联程度。按式(6)定义了损耗影响因素对中低压配电网技术损耗的贡献度为

$$C_{Gi} = \frac{r_i}{\sum r_i} \quad (6)$$

式中:  $C_{Gi}$  为第  $i$  类损耗影响因素对中低压配电网技术损耗的贡献度;  $r_i$  为第  $i$  类参考因素序列对主因素序列的灰色关联度。

## 3 降损规划决策目标函数和约束条件

为了建立更有实际意义的降损规划决策模型,不但要基于损耗影响因素的研究分析配电网降损措施的多种实施方案,还要在规划中多目标地综合评估配电网的经济性、可靠性等。

将降损的措施总类作为改造项目的大类,将某一种措施的可能的实施方案作为配电网改造中的改造项目。假设改造项目之间具有独立性,改造措施之间具有互斥性。

那么,降损改造的备选方案:

$$\left\{ \begin{aligned} f_i &= (x_1^1 \ x_1^2 \ \dots \ x_1^{ki} \ \dots \ x_n^1 \ x_n^2 \ \dots \ x_n^{kn}) \\ x_i^j &= 0 \ \text{or} \ 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

在所选配电网降损决策模型中,以10年为规划的时长,建立包含决策目标函数和决策约束条件的配电网降损优化决策模型<sup>[11]</sup>。

$$\min F = L_{CC} f_i \quad (8)$$

$$\begin{aligned} L_{CC_i} &= \sum_{i=1}^n [C_{Hi} + \sum_{k=1}^N (C_{O_{ik}} + C_{F_{ik}}) r_{DK} + C_{D_{ik}} + r_{DN}] + \\ &\sum_{k=1}^N (\Delta B_{1k} + \Delta B_{2k} + \Delta B_{3k}) r_{DK} \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $L_{CC_i}$  为第  $i$  个配电网降损备选方案的效益值;  $C_{G_i}$  为配电设备  $i$  的购置成本;  $C_{O_{ik}}$ 、 $C_{F_{ik}}$ 、 $C_{D_{ik}}$  分别为第  $k$  年由设备  $i$  造成的运行维护成本、故障成本与拆除回收成本;  $\Delta B_{1k}$ 、 $\Delta B_{2k}$ 、 $\Delta B_{3k}$  分别为第  $k$  年由损耗电量引起的售电费用损失、等效 GDP 值与碳排放罚金;  $n$  为设备总数量;  $N$  为运行年限;  $r_{Dk}$  为第  $k$  年的贴现率,由  $(1+r_l)^{1-k}$  计算  $r_l$  为利率;  $r_{DN}$  为运行年限中最后一年的贴现率。

将灰色关联度法计算的各个影响因素的贡献度参数对应到相对应的改造措施,具体实施如下:

$$C_{I_i} = \sum_t \frac{C_{I_{it}}}{C_{G_i}} \quad (10)$$

$$C_{O_{ik}} + C_{F_{ik}} = \sum_t \frac{C_{O_{ikt}}}{C_{G_i}} + \sum_t \frac{C_{F_{ikt}}}{C_{G_i}} \quad (11)$$

式中:  $t$  是为第  $i$  个配电网改造方案用到的装置种类;  $C_{G_i}$  为装置种类对应影响因素的贡献度。

上述的优化决策模型考虑了综合成本和损耗电量引起的直接成本和间接成本。

决策的约束条件:

1) 供电可靠率应不低于预先设定的规定限值,选用  $R_{S-3}$  指标表示配电网供电可靠率。

$$R_{S-3} = \frac{T_s - T_{off}}{T_s} \times 100\% \geq R_{S_N} \quad (12)$$

2) 用户平均停电时间应不超过预先设定的规定限值。

$$A_{IHC} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{off}} (T_{off}^k \times N_{off}^k)}{n_L} \times 100\% \leq A_{IHC_N} \quad (13)$$

3) 电压偏差的绝对值不能超过标准电压的 7%。

$$\delta U\% = \frac{|U_{re} - U_N|}{U_N} \times 100\% \leq 7\% \quad (14)$$

4) 线路的传输约束一般用传输电流表示:

$$I_l \leq I_{lmax} \quad (15)$$

5) 投资应在预先设定的投资限制之内。

$$\sum_{j \in R} C_{I_j} \leq C_{I_N} \quad (16)$$

## 4 算例分析

选择陕西省富平县的南韩线为例计算线损率并进行降损方案的选择(见图 1)。

线路是中压 10 kV 线路,平均负载率 70%,在规划的初始年的基础上设置负荷的年增长率是 1.05,线路的总长度大约是 2 km,负荷的分布比较密集,负荷的功率因数平均取为 0.85,计算的时候暂时不考虑三相不平衡。以 1 天为单位进行线损计算。

按照改进之后的等值电阻法计算之后,导线的等效阻抗是 0.06,变压器的等效阻抗是 0.17  $\Omega$ ,总等效阻抗是 0.23  $\Omega$ 。

表 1 的线损结果是选取每月 1 日、10 日和 20 日的 24 h 的数据,进行 3 次插值拟合,经过计算得出的线损率,并且取平均值,认为是本月的线损率,所有的数字都是百分数。

为了更加清晰直观地看出线损具体的比例,在项目中选取了 9 月 1 日的 24 h 的瞬时功率,计算 24 h 的瞬时电能损耗在线路、变压器铜损、变压器铁损之间的比例。

从图 2 中可以看出,变压器的铁损在损耗中占的比例最大,最高的时候可以达到 90% 以上,这种时候都是凌晨负荷最低的时候,此时线路轻载。在负荷的高峰期,铁损占的比例会相对小一些,但是仍然在 50% 以上,说明线路依然是轻载的状况。线路损耗占的比例很小,是因为南韩线变压器之间的距离很近,负荷很近,整个南韩线的长度很短,本身的线路电阻很小。

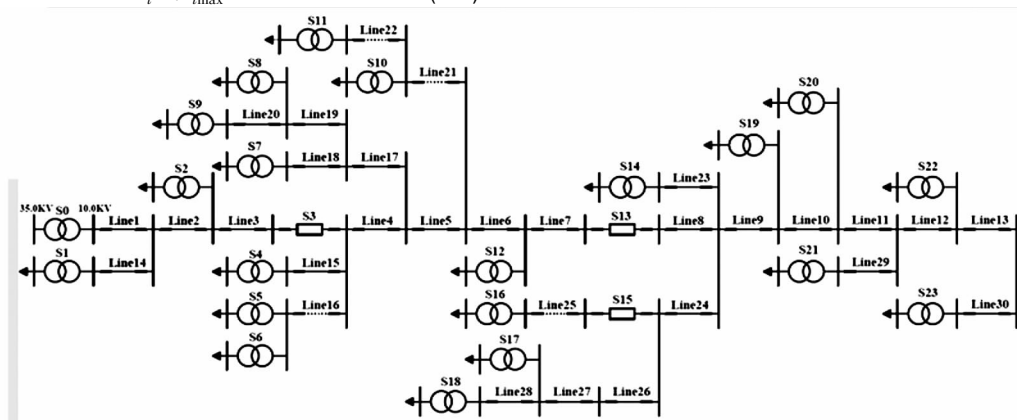


图 1 南韩线接线图

表1 南韩线计算的线损结果总览

时间	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月
1日	1.60	1.76	1.64	1.42	1.38	1.58	1.41	1.78	1.81	1.72	1.50	1.43
10日	1.73	1.76	1.54	1.41	1.39	1.39	1.52	1.73	1.85	1.54	1.74	2.43
20日	1.69	1.78	1.43	1.39	1.40	1.39	1.71	1.74	1.81	1.57	1.52	2.23
平均	1.67	1.77	1.53	1.41	1.39	1.45	1.55	1.75	1.82	1.61	1.59	2.03

单位: %

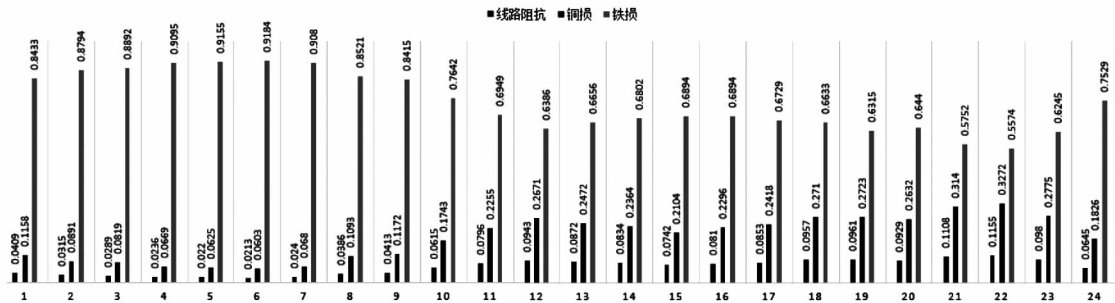


图2 南韩线9月1日24h瞬时损耗比例总览

#### 4 灰色关联法评估影响因素

从前面的计算结果中可以看出,线损率受到多种因素的影响<sup>[5]</sup>。

1) 线路阻抗: 因为线路存在一定的阻抗,当电流流过线路的时候会产生有功损耗。影响因素包括线径、负载大小和运行的电压等。

2) 变压器的铁损: 配电变压器的损耗由空载损耗和负载损耗组成。影响因素包括变压器本身的参数和变压器的负载率。

3) 功率因数: 功率因数下降,说明在线路中的无功流动比较多,导致线路损耗增加。

4) 三相不平衡: 三相不平衡会导致零线电流过大,对零线的过载能力提出了更高的要求<sup>[9,10]</sup>。

下面针对这4种因素进行建模,分别计算:假设功率因数是0.9、0.875、0.825、0.8,线路的电阻是现有电阻的1.2、1.1、0.9、0.8倍,变压器的铁损是现有的1.2、1.1、0.9、0.8倍,三相中取A、B相的不平衡度是0.1、0.15、0.2、0.25时候的线损率。选取的是南韩线9月1日18:00的数据进行分析,采用灰色关联度分析,确定3个因素对损耗结果影响程度。

灰色关联度分析的结果见图3。

从图3中可以看出:对于最后线损的影响程度,三相不平衡 > 功率因数 > 变压器铁损 > 线路电阻。

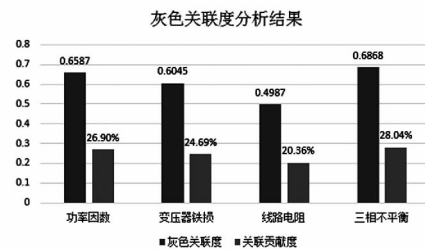


图3 灰色关联度分析的结果

在计算的过程中发现变压器的损耗占的比例很大,这主要是由于线路轻载。采用灰色关联度分析可以发现配电网网损的主要因素,从而有针对性地进行治理。

#### 5 降损规划决策模型以及降损措施的选择

为了简化算例,忽略不符合现实的方法,选择下列几种类型的降损措施,可以单独实施或组合实施:

- 1) 更换新型电缆;
- 2) 更换新型的变压器;
- 3) 投入无功补偿器;
- 4) 平衡三相负荷。

配电网改造的流程如下:

1) 参考前面灰色关联度分析结果,确定对线损起重要作用的影响因素的参数;

2) 基于损耗影响因素的分析,确定对配电网优化决策改造项目的选择;

3) 根据经验措施和已有的降损措施成果罗列可供选择的改造项目;

4) 忽略项目间互斥关系约束,根据改造项目的各种组合生成初始的配电网降损改造备选方案。

本次主要根据灰色关联度的结果,针对功率因数、线路、变压器以及安装三相平衡装置4个方面进行改进。配电网的主要设备型号和价格如表2、表3所示。

表2 电缆型号和价格

线路型号	价格(元/km)	线路型号	价格(元/km)
JKLYJ-35	2 100	YJV22-3×35	70 000
JKLYJ-50	3 200	YJV22-3×50	115 000
JKLYJ-70	4 200	YJV22-3×70	177 000
JKLYJ-95	5 500	YJV22-3×120	276 000
JKLYJ-150	8 400	YJV22-3×150	505 000
JKLYJ-240	13 500	YJV22-3×240	624 000
JKLYJ-300	18 000	YJV22-3×300	804 000
JKLYJ-400	30 000	YJV22-3×400	1 094 000

表3 变压器型号和价格

S11型变压器	价格(元/台)	S13型变压器	价格(元/台)
S11-75	7 800	S13-75	13 700
S11-100	8 700	S13-100	15 000
S11-125	12 000	S13-125	18 600
S11-200	19 000	S13-200	25 200
S11-250	23 500	S13-250	28 000
S11-315	26 500	S13-315	32 000
S11-400	32 000	S13-400	45 000
S11-630	45 800	S13-630	55 000

南韩线中压线路的型号是YKLYJ系列。变压器型号是S9。取单位设备的人工费用为100元,假设线路的维护因子是0.02,变压器的维护因子是0.02,平均年维护次数是4次,中压线路的故障率是1.3次/(100 km·年),中压线路的平均故障停电时间是4 h,变压器的故障率取0.1次/(100台·年),故障造成的平均故障时间是5 h。报废因子和回收因子分别是0.1和-0.3。查阅文献资料可以知道,2012年的初始GDP转换系数为10.47元/kWh,近似认为社会用电量增长率和GDP增长率是线性关系,并且前者的增长率是后者的1/1.1倍。1 t燃料充分的碳排放是0.3 kg,燃料的单位发热量是10 kJ/t,电源的能量转换效率是1.5 kWh/kJ<sup>[14]</sup>。对线路的

三相进行电流测量之后,取三相不平衡度是0.2;根据不平衡电流的大小以及将功率因数提高到0.95需要的无功容量,选择电能质量矫正装置(SPC),选用两种型号(50 kvar 2万元)、(100 kvar 4万元)。

所选的配电网的降损决策,以10年为一个长期规划的时间段。表4中的数据是规划方案目标函数10年的计算结果,A为更换新型电缆(先选取JK-LYJ型号),B为更换变压器,C为安装无功补偿装置,D为安装三相补偿装置。取方案标记为(A,B,C,D),数值为1的时候代表采取措施,数值为0的时候表示没有采取措施。

表4 规划方案的目标函数计算结果

方案编号 (A,B,C,D)	计算结果 /万元	方案编号 (A,B,C,D)	计算结果 /万元
(0,0,0,0)	4 192	(0,1,1,0)	2 906
(1,0,0,0)	4 114	(0,1,0,1)	3 010
(0,1,0,0)	3 252	(0,0,1,1)	3 166
(0,0,1,0)	3 945	(1,1,1,0)	3 041
(0,0,0,1)	3 378	(1,1,0,1)	2 892
(1,1,0,0)	3 165	(1,0,1,1)	3 158
(1,0,1,0)	3 981	(0,1,1,1)	2 713
(1,0,0,1)	3 317	(1,1,1,1)	2 735

可以看出不同的方案对于目标函数的影响结果是不同的。当采取的措施种类增加的时候,会导致包括购置成本、运行维护成本在内的成本上升,但是同时也会降低电能损耗。在目标函数的权值计算过程中,因为购置成本在10年被分摊了,影响目标函数较大的是损耗电量引起的直接费用和损耗电量的等效GDP值。

从表4中的数据也可以看出,最优的方案是(0,1,1,1)相对不采取措施的目标函数的数值,降低的幅度达到35.3%。在具体实行的时候,也可以进一步对采取的措施再次细化优选比较。

采用禁忌搜索算法进行求解和优选:

根据所选择的降损措施,定义算例配电网的第*i*个方案是 $x_i(x_1, x_2, x_3, x_4)$ , $x_1, x_2, x_3, x_4$ 分别对应的是更换线路、更换变压器、无功补偿和平衡三相负荷的降损措施,数值可以取为0或者1。将方案(0,0,0,0)作为初始规划方案,在搜索过程中当前最优方案每次生成2种相邻方案。预设最大迭代次数是

(下转第47页)

参考文献

[1] 韩英铎,林孔兴. 电力系统中的三项前沿课题——柔性输电技术、智能控制、基于GPS的新一代动态安全稳定分析与监测系[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(7): 1-6.

[2] 曹一家,陶佳,王光增,等. FACTS 控制器间交互影响及协调控制研究进展[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 1-8.

[3] 郑彬,班连庚,宋瑞华,等. 750 kV 可控高抗应用中需注意的问题及对策[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 88-92.

[4] 周腊吾,朱英浩,周之光. 特高压可控并联电抗器的调节范围[J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 116-119.

[5] 周勤勇,郭强,卜广全,等. 可控电抗器在我国超/特高压电网中的应用[J]. 电网技术, 2007, 27(7): 1-7.

[6] 王轩,邓占锋,于坤山. 超高压磁控式并联电抗器稳态

特性[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(33): 104-109.

[7] 周沛洪,何慧雯,戴敏,等. 可控高抗在1 000 kV 交流紧凑型输电线路中的应用[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1832-1842.

[8] 蒋大鹏. 适用于特高压的可控电抗器建模与仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.

[9] 刘洪恩. 可控并联电抗器及其在特高压交流输电中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.

[10] 张建兴,王轩,雷晰,等. 可控电抗器综述[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 269-272.

[11] 邓占锋,王轩,周飞,等. 超高压磁控式并联电抗器仿真建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(36): 108-113.

[12] 李仲青,周泽昕,杜丁香,等. 超/特高压高漏抗变压器式分级可控并联电抗器的动态模拟[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 6-10.

(收稿日期: 2017-04-10)

(上接第28页)

20 或者当前最优方案保持4次迭代不变或者相邻的方案都在禁忌表中,则将当前最优方案作为全局最优。具体的搜索结果见表5。

表5 禁忌搜索结果

迭代次数	当前最优方案重复次数	当前最优方案	最优目标函数值/万元
6	4	(0, 1, 1, 1)	2 906

根据表5中数据可以看出,经过禁忌搜索的结果为:同时采用更换变压器、安装无功补偿装置和安装三相平衡装置的规划方案,搜索的结果和直接比较目标函数的结果是一样的;并且算例结构也表明,使用禁忌搜索法可以减少优选过程的计算量,缩短时间,提高计算的效率。

6 结 语

针对配电网降损措施难以定量选择的问题,提出了一种城市中低压配电网降损决策的方法,有利于高效低碳的电网建设工作。所提出的配电网降损措施的决策模型,不但关注了降损措施带来的经济效益,并且兼顾了环境效益,计及了中低压配电网的

多个规划目标,对现在的配电网改造有一定的参考意义,具有很好的实用性。

参考文献

[1] 邵成成,王锡凡,王秀丽,等. 主动配电系统与主网的有功协调[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(11): 58-63.

[2] 魏春,韩民晓,杨霞. 低碳经济对电网负荷率特性的影响分析[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 100-104.

[3] 赵波,王财胜,周金辉,等. 主动配电网现状与未来发展[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 125-135.

[4] 陈飞,刘东,陈云辉. 主动配电网电压分层协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 61-67.

[5] 万东,张忠会. 基于可靠性的配电网用户停电损失估算方法研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(10): 8-11.

[6] 王彬宇. 城市中低压配电网损耗分析与降损技术选择方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

[7] 韩学军,王晶浩,潘超,等. 综合补偿三相不平衡负载的研究[J]. 电网技术, 2006, 32: 288-291.

[8] 张五一,张言滨,刘华伟. 配电网三相负荷不对称的线损分析[J]. 继电器, 2007, 35(7): 24-27.

(收稿日期: 2017-03-27)