

配电网低压侧自动无功补偿装置安装位置的优化规划

胡海燕¹, 刘健², 武晓朦¹

(1. 西安石油大学自动化系, 陕西 西安 710065; 2. 陕西银河电力自动化股份有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 认为安装低压侧自动无功补偿装置的节点的无功功率较好地实现了无功补偿, 使补偿后负荷的功率因数提高到 0.95 以上, 建立了在部分节点安装低压侧自动无功补偿装置的配电网简化模型, 分别以减少的有功网损最大和投资收益最高为目标函数, 并采用惩罚函数的办法对低压侧自动无功补偿装置的安装数量加以约束, 使之基本满足预算要求, 以各个节点电压符合要求及各个设备不超过其电气极限为约束条件, 在此基础上, 采用遗传算法确定了低压侧自动无功补偿装置的最佳安装位置。文中给出了程序流程图和规划实例, 结果表明提出的方法是可行的。

关键词: 配电网; 无功补偿; 无功优化规划; 遗传算法

中图分类号: TM714.3; TM72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)19-0021-05

0 引言

配电网无功补偿对于降低线路损耗、提高线路传输能力和确保电压质量具有重要意义。采用并联电容器是配电网无功补偿的主要途径, 包括 3 种常用方式: 在变电站或开闭所 10 kV 母线装设可分组投切的电容器组实现集中补偿; 在配电线路上装设并联电容器实现分散补偿; 在变压器低压侧装设可自动投切的低压无功补偿装置实现就地补偿。第 1 种方式一般只能改善主变和上游电网的无功分布, 而不能降低配电线路损耗; 第 2 种方式可以改善配电线路的无功分布, 而不能降低配电变压器的损耗, 并且由于受到安装场地的限制, 安装在线路上的电容器一般不具有分组投切功能, 因此其补偿效果显著受到负荷变化的影响; 第 3 种方式不仅可以改善配电线路的无功分布, 而且可以降低配电变压器的损耗, 并且成本较低, 安装方便, 非常容易实现自动分组投切, 因此是一种较好的无功补偿方式。

但是配电网上的配电变压器数量很大, 由于受到建设资金的限制, 不可能在每一台配电变压器低压侧都安装无功补偿装置, 因此有必要研究如何在有限的资金下, 科学地选择安装低压侧无功补偿装置的配电变压器, 实现最大的降损效益。

近年来, 在配电网无功优化规划领域已经取得了长足的进展, 文献[1]采用启发式算法将无功规划问题分成主问题和从问题, 解决电容器的安装位置及其容量大小的问题; 文献[2]提出了适用于高、中压配电网的动态无功优化算法, 将动态优化模型转

化成同普通无功优化模型完全相同的表达形式来降低系统的能量损耗; 文献[3]采用 Bender's 分解技术, 分别考虑了单负荷水平和多负荷水平 2 种情况, 把无功优化问题分解为投资和运行 2 个子问题, 解决了线性化运行子问题求解时可能出现的不可行情况; 文献[4]采用模糊集表示多目标和软约束, 通过分段隶属函数, 把原优化问题转化为线性规划; 文献[5]应用进化算法求解无功优化问题; 文献[6]将 Tabu 搜索用于电力系统无功补偿优化与配置。

但是这些研究成果都是主要针对高、中压配电网的无功优化规划问题, 没有解决配电网低压侧无功补偿装置布点的优化规划问题, 而这正是本文探讨的主要问题。

1 配电网的数学模型

图 1(a) 所示为一个具有 N 个节点的典型的配电网, 图 1(b) 为其对应的等值电路。

在图 1(b) 中, $Z_{Lk} = R_{Lk} + jX_{Lk}$ 为支路 k 的阻抗; 双绕组变压器用 π 形等值电路表示, $Z_{Tk} = R_{Tk} + jX_{Tk}$, $Y_{Tk} = G_{Tk} + jB_{Tk}$ 分别为节点 k 处变压器的阻抗支路的阻抗值和励磁支路的导纳值; $S_k = P_k + jQ_k$ 为节点 k 处供出的负荷值; C_k 为低压侧自动无功补偿装置; U_k 和 U_k 表示节点 k 处变压器的端电压。

考虑到配电网一般采取辐射状运行方式, 我们采用前推回代法进行潮流计算, 可以得到安装低压侧自动无功补偿装置补偿后整个配电网减少的有功网损 P , 它包括两部分, 即配电线路减少的有功损耗 P_L 和配电变压器减少的总有功损耗 P_T , 即

$$P = P_L + P_T \quad (1)$$

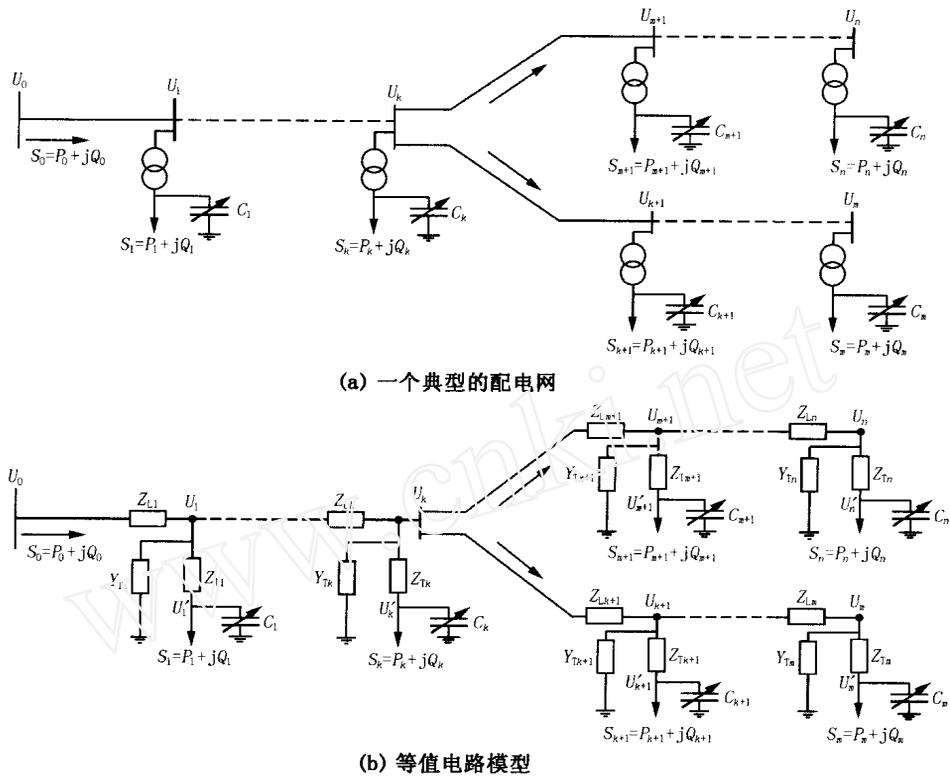


图 1 一个典型配电网及其等值电路

Fig. 1 A typical distribution network and its equivalent circuit

配电线路减少的有功损耗 P_L 可表示为：

$$P_L = \sum_{k=1}^M (I_{k0}^2 - I_k^2) R_{Lk} \quad (2)$$

其中： I_{k0} 和 I_k 分别为补偿前后流过第 k 条支路的电流； R_{Lk} 为第 k 条线路的电阻； M 为该配电网中支路的个数。

节点 k 处的配电变压器减少的有功损耗的计算如式(3) ~ (8)所示。

$$S_{ZT0} = \sum_{k=1}^N \left(\frac{S_k^2}{U_{k0}^2} Z_{Tk} \right) = \sum_{k=1}^N \left(\frac{P_k^2 + Q_k^2}{U_{k0}^2} R_{Tk} + j \frac{P_k^2 + Q_k^2}{U_{k0}^2} X_{Tk} \right) \quad (3)$$

$$S_{YT0} = \sum_{k=1}^N [(Y_{Tk} U_{k0})^* U_{k0}] = \sum_{k=1}^N (G_{Tk} U_{k0}^2 + j B_{Tk} U_{k0}^2) \quad (4)$$

$$S_{ZT} = \sum_{k=1}^N \left(\frac{S_k^2}{U_{k1}^2} Z_{Tk} \right) = \sum_{k=1}^N \left(\frac{P_k^2 + (Q_k - Q_c)^2}{U_{k1}^2} R_{Tk} + j \frac{P_k^2 + (Q_k - Q_c)^2}{U_{k1}^2} X_{Tk} \right) \quad (5)$$

$$S_{YT} = \sum_{k=1}^N [(Y_{Tk} U_{k1})^* U_{k1}] = \sum_{k=1}^N (G_{Tk} U_{k1}^2 + j B_{Tk} U_{k1}^2) \quad (6)$$

$$S_{ZT} = S_{ZT0} - S_{ZT}; \quad S_{YT} = S_{YT0} - S_{YT} \quad (7)$$

$$P_T = \text{Re}[S_{ZT} + S_{YT}] \quad (8)$$

其中： H^* 为 H 的共轭； U_{k0} 和 U_{k0} 表示各个节点处均不安装低压侧自动无功补偿装置时节点 k 处变压器的端电压， U_{k1} 和 U_{k1} 表示若干节点安装低压侧自动无功补偿装置时节点 k 处变压器的端电压； S_{ZT0} 和 S_{ZT} 分别为安装低压侧自动无功补偿装置前、后整个配电网的变压器阻抗支路中的损耗， S_{ZT} 为安装低压侧自动无功补偿装置后减少的这部分损耗； S_{YT0} 和 S_{YT} 分别为安装低压侧自动无功补偿装置前、后整个配电网的变压器励磁支路中的损耗， S_{YT} 为安装低压侧自动无功补偿装置后减少的这部分损耗； Q_c 为低压侧自动无功补偿装置补偿的电容容量。

由于低压侧无功补偿装置采取单片机构成的本地智能装置，按照负荷无功功率的实际需要量实时地投切电容器组，在电容器组的容量选择恰当时，可以认为补偿后相应负荷的功率因数 $\cos \phi$ 提高到 0.95 以上，因此式(5)变成：

$$S_{ZT} = \sum_k \left(\frac{P_k^2 + (S_k \sin \phi)^2}{U_{k1}^2} R_{Tk} + j \frac{P_k^2 + (S_k \sin \phi)^2}{U_{k1}^2} X_{Tk} \right) + \sum_k \left(\frac{P_k^2 + Q_k^2}{U_{k1}^2} R_{Tk} + j \frac{P_k^2 + Q_k^2}{U_{k1}^2} X_{Tk} \right) \quad (9)$$

其中: Ω 表示该配电网中全部节点的集合; Ω_c 表示该配电网中安装低压侧自动无功补偿装置的节点的集合; ϕ 为相应节点补偿后的功率因数角。

2 采用遗传算法获得低压侧无功补偿装置的最佳安装位置

对于低压侧自动无功补偿装置的最佳安装位置优化规划问题,很难找到一条启发式规则,而且即使采用启发式方法,也难免落到局部最优解,因此采用遗传算法开展这项工作比较合适,本节就论述具体的方法。

1) 染色体编码方案

将所有可能安装低压侧自动无功补偿装置的位置当作基因,采用二进制编码方式,若某个位置装有低压侧自动无功补偿装置,则该位置对应的基因为1,否则为0。这样染色体的总长度为可能安装低压侧自动无功补偿装置的位置的总个数。

2) 适应度的计算

对于本问题,可以采取两种目标函数:一种是以进行低压侧自动无功补偿后减少的有功损耗最大为目标函数;另一种是以投资收益最大为目标函数。

以系统减少的有功网损 P 最大为目标函数时,则有

$$\text{Object}(X) = \text{Max}(P) = \text{Max}(P_L + P_T) \quad (10)$$

考虑低压侧自动无功补偿装置的设备费用和安装费用,以投资收益最大为目标函数时,则有

$$\text{Object}(X) = \text{Max}(P - \text{cost}) \quad (11)$$

其中: cost 为低压侧自动无功补偿装置的设备费用和安装费用之和; λ 为电价因子; T 为规划考察期。

对于这两种情况,都可以令适应函数

$$\text{Fitness}(X) = \text{Object}(X) \quad (12)$$

3) 约束条件

本问题的约束条件包括: 节点电压应在规定的范围内; 流过线路及变压器的电流应满足相应设备电气极限参数的约束; 从能够筹集到的资金的角度出发。所安装的低压侧自动无功补偿装置的总个数也要作为约束条件,但是对于这项约束,我们不加以严格限制,而是在目标函数中采用惩罚函数的办法处理,因此,式(11)和(12)可以表示成如式(13)和(14)所示的增广目标函数:

$$\text{Object}(X) = P_{\text{Loss},0} - \text{Min}[P_{\text{Loss},1} + \left(\frac{|T-D| - (T-D)}{2}\right)^2] \quad (13)$$

$$\text{Object}(X) = \text{Min}\left[\frac{1}{P - \text{cost}} + \left(\frac{|T-D| - (T-D)}{2}\right)^2\right] \quad (14)$$

其中: $P_{\text{Loss},0}$ 和 $P_{\text{Loss},1}$ 分别为安装低压侧自动无功补偿装置前、后整个配电网的有功损耗; T 为低压侧自动无功补偿装置的预算个数; D 为实际安装的低压侧自动无功补偿装置的个数; λ 为实际安装个数超过预算个数的惩罚因子。

由式(13)和式(14)可见,增广目标函数的设计是只有实际安装个数超过预算个数时才惩罚,而实际安装个数少于预算个数时不罚,惩罚的力度由参数 λ 掌握。

4) 遗传操作

个体的遗传操作采用了轮盘赌的方法进行选择 and 复制,采用了单点交叉和基本位变异算子来进行群体的更新,其具体实现步骤如文献[7]所描述。

5) 程序流程图

采用遗传算法获得低压侧无功补偿装置的最佳安装位置的程序流程如图2所示。

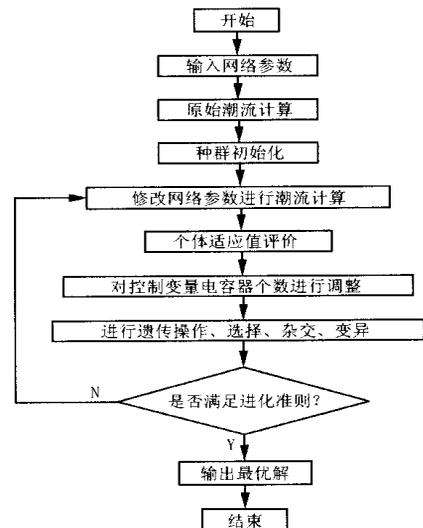


图2 提出的方法的程序流程图

Fig. 2 Flow chart of the proposed method

3 实例

采用本文提出的方法对大量配电网在给定费用规模的前提下,对低压侧自动无功补偿装置安装位置进行了优化规划,均收到了满意的效果。

例如,对于图3所示的36节点的配电网,节点23为电源节点,节点26,28,30和31为开关节点,节点3,25,27为T接点,节点2,4,24和29为末梢点,其余节点均为负荷节点,各负荷节点采用的变压器型号和负荷值如表1所示。导线采用LG-120,各馈线段长度如表2所示。

表 1 各节点采用的变压器型号和负荷值

Tab. 1 Transformer types and load parameters in each node

| 负荷节点 编号 | 变压器型号 | 负荷幅值 /kVA | 负荷相角 /(°) |
|------------|--------------|--------------|--------------|
| 113 | SL7 - 250/10 | 0.134 | 32.7 |
| 114 | SL7 - 250/10 | 0.232 | 38.4 |
| 136 | SL7 - 250/10 | 0.024 | 37.3 |
| 137 | SL7 - 200/10 | 0.283 | 33.2 |
| 138 | SL7 - 200/10 | 0.334 | 32.7 |
| 139 | SL7 - 100/10 | 0.233 | 36.4 |
| 142 | SL7 - 250/10 | 0.135 | 36.3 |
| 143 | SL7 - 250/10 | 0.037 | 33.6 |
| 144 | SL7 - 200/10 | 0.354 | 32.3 |
| 145 | SL7 - 200/10 | 0.332 | 35.0 |
| 146 | SL7 - 100/10 | 0.153 | 32.0 |
| 115 | SL7 - 250/10 | 0.364 | 32.6 |
| 116 | SL7 - 315/10 | 0.127 | 35.7 |
| 117 | SL7 - 315/10 | 0.075 | 32.8 |
| 118 | SL7 - 160/10 | 0.233 | 31.9 |
| 119 | SL7 - 250/10 | 0.244 | 33.9 |
| 120 | SL7 - 100/10 | 0.165 | 37.2 |
| 121 | SL7 - 315/10 | 0.186 | 33.3 |
| 122 | SL7 - 315/10 | 0.168 | 35.5 |
| 124 | SL7 - 315/10 | 0.074 | 37.3 |
| 123 | SL7 - 315/10 | 0.022 | 33.7 |
| 125 | SL7 - 315/10 | 0.145 | 33.2 |
| 126 | SL7 - 315/10 | 0.233 | 39.3 |
| 127 | SL7 - 315/10 | 0.044 | 32.7 |

表 2 各支路长度

Tab. 2 Length of each branch

| 起始节点 | 终止节点 | 馈线长度 / km | 起始节点 | 终止节点 | 馈线长度 / km |
|------|------|--------------|------|------|--------------|
| 23 | 113 | 0.90 | 115 | 116 | 0.60 |
| 113 | 114 | 0.20 | 116 | 30 | 0.35 |
| 114 | 27 | 0.40 | 30 | 117 | 0.25 |
| 27 | 26 | 0.35 | 117 | 118 | 0.50 |
| 26 | 136 | 0.85 | 118 | 119 | 0.50 |
| 136 | 137 | 0.15 | 119 | 31 | 0.20 |
| 137 | 25 | 0.90 | 31 | 120 | 0.65 |
| 25 | 138 | 0.95 | 120 | 121 | 0.25 |
| 138 | 139 | 0.75 | 121 | 122 | 1.20 |
| 139 | 24 | 0.15 | 122 | 3 | 0.85 |
| 25 | 142 | 0.65 | 3 | 124 | 0.25 |
| 142 | 143 | 0.50 | 124 | 123 | 0.90 |
| 143 | 28 | 0.45 | 123 | 2 | 0.55 |
| 28 | 144 | 1.15 | 3 | 125 | 0.40 |
| 144 | 145 | 0.25 | 125 | 126 | 0.20 |
| 145 | 146 | 0.95 | 126 | 127 | 0.90 |
| 146 | 29 | 1.35 | 127 | 4 | 0.65 |
| 27 | 115 | 0.80 | | | |

显然,可以安装低压侧自动无功补偿装置的位置分别为:节点 113、114、115、116、117、118、119、120、121、122、123、124、125、126、127、136、137、138、139、142、143、144、145 和 146,共 24 处,也即染色体长度为 24。

设低压侧自动无功补偿装置的预算个数 T 为 6,惩罚因子为 10 000,每台低压侧自动无功补偿装置的设备费与安装费之和为 12 000 元,为 0.5 元/kWh,为 1 年,补偿后负荷的功率因数为 0.96。

选取种群规模为 80,终止迭代次数为 100 代,收敛精度为 0.000 01,交叉率为 0.5,变异率为 0.01,分别以进行低压侧自动无功补偿后减少的有功损耗最大和投资收益最高为目标函数,最终获得的优化规划结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 以减少的有功网损最大为目标函数的优化规划结果

Tab. 3 Results of optimal planning with the index of maximum reduction of active power loss

| 约束个数 | 优化结果 | 实际安装位置 | P/ kVA |
|------|------|------------------------------------|--------|
| 8 | 8 | 节点 115,120,122,137,138,139,144,145 | 31.518 |
| 7 | 7 | 节点 115,126,137,138,139,144,145 | 29.774 |
| 6 | 6 | 节点 115,126,138,139,144,145 | 26.869 |
| 5 | 5 | 节点 126,138,139,144,145 | 23.288 |
| 4 | 4 | 节点 138,139,144,145 | 19.835 |

表 4 以投资收益最高为目标函数的优化规划结果

Tab. 4 Results of optimal planning with the index of the tallest return for investment

| 约束个数 | 优化结果 | 实际安装位置 | P/ kVA | 投资收益 / 万元 |
|------|------|--------------------------------|--------|--------------|
| 8 | 7 | 节点 114,118,120,125,137,138,139 | 22.475 | 1.444 0 |
| 7 | 7 | 节点 115,120,126,138,139,144,145 | 22.997 | 4.738 |
| 6 | 6 | 节点 115,126,138,139,144,145 | 26.869 | 4.567 8 |
| 5 | 5 | 节点 115,138,139,144,145 | 23.506 | 4.295 8 |
| 4 | 4 | 节点 138,139,144,145 | 19.835 | 3.888 7 |

从表 1 可以得出:以减少的有功网损最大为目标函数时,安装低压侧自动无功补偿装置的个数越多,整个配电网减少的有功网损越大,所以在一定的资金同时满足约束条件的前提下,应尽可能多地安装低压侧无功补偿装置来获得最大的降损效益。在以投资收益最高为目标函数,配电网低压侧自动无功补偿装置的个数为 7 个时投资收益最大。

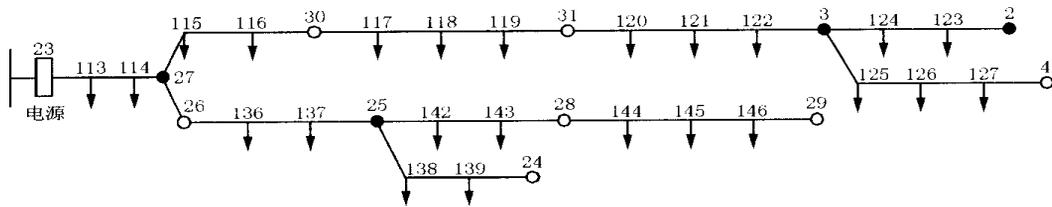


图3 36节点网络结构图

Fig. 3 A distribution network with 36 nodes

4 结论

本文提出的方法解决了在给定费用规模下,配电网低压侧自动无功补偿装置安装位置的优化规划问题,分别以减少的有功网损最大和投资收益最高为目标函数,通过在部分变压器的低压侧根据负荷无功功率的需要量装设自动无功补偿装置,对负荷无功进行补偿,使补偿后负荷的功率因数提高到0.95以上,达到了降低了整个配电网的有功损耗的目的,运用惩罚函数的办法可以控制可自动投切电容器的总的个数。经大量算例计算表明,此算法收敛性好,适应性强,鲁棒性强,具有实用价值。

参考文献:

- [1] Lebow W M, Rouhani R, Nadira R, et al. A Hierarchical Approach to VAR Optimal Reactive in System Planning[J]. IEEE Trans on PAS, 1998, 104(8): 2051-2057.
- [2] 任晓娟,邓佑满,赵长城,等(REN Xiao-juan, DENG You-man, ZHAO Chang-cheng, et al). 高中压配电网动态无功优化算法的研究(Study on the Algorithm for Dynamic Reactive Power Optimization of Distribution Systems)[J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2003, 23(1): 31-36.
- [3] 王成山,唐晓莉,余贻鑫,等(WANG Cheng-shan, TANG Xiao-li, YU Yi-xin, et al). 基于启发式算法和Benders's分解的无功优化规划(Application of Benders Decomposi-

tion Based on a Hierarchical Programming in Reactive Power Planning)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1998, 22(11): 14-17.

- [4] 陈星莺,钱锋,杨素琴(CHEN Xing-ying, QIAN Feng, YANG Su-qin). 模糊动态规划法在配电网无功优化控制中的应用(Application of Fuzzy Dynamic Programming Approach to Optimal Reactive Control in Distribution System Technology)[J]. 电网技术(Power System Technology), 2003, 27(2): 68-71.
- [5] Lai L L. Application of Evolutionary Programming to Reactive Power Planning—Comparison with Nonlinear Programming Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 198-206.
- [6] Huang Y C, Yang H T, Huang C L. Solving the Capacitor Placement Problem Using Tabu Search Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4).
- [7] 周明,孙树栋(ZHOU Ming, SUN Shu-dong). 遗传算法原理及应用(Genetic Algorithms Theory and Applications)[M]. 北京:国防工业出版社(Beijing: Defense Industrial Press), 2000.

收稿日期: 2004-02-24

作者简介:

胡海燕(1979-),女,研究生,研究领域为配电网的无功优化; E-mail: shihonxun@163.com

刘健(1967-),男,博士,教授,博士生导师,IEEE高级会员,研究领域为电力系统自动化。

Optimal placement of automatic reactive compensation equipment on the low voltage side of distribution transformers

HU Hai-yan¹, LIU Jian², WU Xiao-meng¹

(1. Xi'an Petroleum University, Xi'an 710065, China; 2 Shaanxi Galaxy Electric Power Automation Co., Ltd, Xi'an 710075, China)

Abstract: On the basis of the assumption that reactive powers of the nodes with automatic reactive compensation equipment (ARCE) are well compensated and the power factor of the corresponding nodes are over 0.95, a simplified model of distribution network with a number of ARCEs is established. A genetic algorithm is used to determine the optimal installation location of the ARCEs. The index of maximum reduction of active power losses and the index of the highest benefit investment ratio are used as the objective function respectively. The total number of ARCEs is restricted by using a punishable function to meet the requirement of the budget. The restricted conditions also include that the voltage of all nodes are within the desired range and that all the equipment does not overload. A block diagram of procedure and relevant example is given in the paper. The feasibility of the proposed method is verified by the results of an example.

Key words: distribution network; reactive power compensation; reactive power optimization planning; genetic algorithm