

## 配电网节能改造优化建模研究

张勇军<sup>1</sup>, 陈超<sup>1</sup>, 廖民传<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学电力学院广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 广东省电力设计研究院, 广东 广州 510600)

**摘要:** 导线改造和无功补偿是实现配电网节能降耗的两项关键措施。提出了一种导线更换和中低压无功配置协同优化的配电网节能改造优化模型, 以年总支出费用最小为目标, 以导线更换线径、各种无功补偿组数和容量为控制变量, 满足各种运行约束和安装维护约束, 并采用分组整数编码的灾变遗传算法进行求解。以某地区实际配电线路改造为例, 分别计算仅按经济电流密度进行导线更换、仅进行中低压无功补偿和将导线更换与中低压无功配置协同优化这三种改造方案的效益, 结果表明提出的模型具有更好的降损效益和应用价值。

**关键词:** 配电网; 节能; 导线更换; 中低压无功配置; 灾变遗传算法

### Research on optimal model for energy saving reconstruction of distribution networks

ZHANG Yong-jun<sup>1</sup>, CHEN Chao<sup>1</sup>, LIAO Min-chuan<sup>2</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou 510600, China)

**Abstract:** Lines replacement and reactive power compensation are two key measures for saving energy in distribution networks. A model considered with lines replacement and reactive power compensation collaborative optimization of distribution networks is presented, which takes annual total expense minimum as the objective and the line replacement, various reactive compensation groups and capacity as the control variables, satisfied with different operational and installed constraints. Cataclysmic genetic algorithm with grouped integer encoding is adopted to solve this problem. Finally, the benefit gained from different modification schemes of lines replacement according to economic current density, reactive power compensation and lines replacement and reactive power compensation collaborative optimization applied in a real distribution feeder shows that the proposed model is more benefit and practical.

This work is supported by National Natural Science Foundation of Guangdong Province(No.06025630).

**Key words:** distribution networks; energy saving; lines replacement; reactive power compensation; cataclysmic genetic algorithm

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)15-0060-05

## 0 引言

近年来负荷持续快速增长, 配电网中广泛存在着线路导线负载过重、无功补偿欠缺、线损率偏高的现象。在当前能源供应日趋紧张的形势下, 积极采取合理的节能降耗措施, 有效降低配电网电能损耗, 将具有重要的经济和社会效益<sup>[1]</sup>。

导线改造和中低压无功配置是配电网节能降耗改造工程中的两项关键手段。导线型号受环境等客观条件的影响, 截面的选择长期以来主要依据经济电流密度。我国最新一次导线经济电流密度由原水利电力部于1987年颁布, 距现在已逾22年, 如今

金属材料价格及电价、制造工艺、负荷情况均发生了巨大的变化, 其有效性和适用于现阶段的改进方法值得探讨<sup>[2-4]</sup>。而需要注意的还有, 经济电流密度本身只是一个经济参考值而非最优值, 真正最优化的导线型号截面理应是针对具体线路运行状况, 充分考虑改造投资和降损效益而得出。关于配电网无功配置, 国内外的研究已经相当深入并取得众多的成果。文献[5]考虑了投资规模, 将每个可能安装低压侧自动无功补偿装置的位置作为基因, 运用遗传算法来对配电网低压侧进行动态无功优化规划。文献[6]从工程实际出发, 提出10 kV配电网杆上无功补偿方式的模型。文献[7-8]主要研究高中压配电网无功优化的方法, 文献[9]采用分支线末端配电变压

基金项目: 广东省自然科学基金项目(06025630)

器低压侧和中压主馈线相结合的优化补偿方式来进行无功优化。但实际配网改造中, 仅进行导线更换或仅进行中低压无功补偿是不够的, 两者往往同步实施, 两项措施都通过一定程度改变线路的潮流来达到降损效果, 这时, 前者将影响后者的无功补偿容量甚至位置, 而后者将影响前者的导线载流量和截面选择, 因此, 实现导线改造与中低压多种无功补偿方式的协同优化, 对制定全局最优的配电网节能降耗改造方案具有重要实际价值。

为此本文在充分考虑投资效益的前提下, 以年总支出费用最小为目标函数, 建立导线更换和中低压无功配置协同优化的配电网节能改造优化模型, 以配电网运行、补偿设备安装维护和线路结构等为约束变量, 采用突变遗传算法进行求解。通过某实际配电网优化改造的结果验证了该模型的实用性和优越性。

## 1 数学模型

目前配电网节能改造中, 导线型号依客观条件确定后, 主要关心的是截面的合理选取; 而无功补偿包括三种类型: 杆上动态分组补偿、杆上固定补偿和低压动态分组补偿, 主要关心其配置容量(及分组)和装设位置。本文模型的目的是在满足一定负荷需求的基础上, 通过协同优化导线更换截面和中低压无功补偿位置和容量, 以达到投资效益和降损效益综合最佳, 并满足各种约束条件。

### 1.1 目标函数

导线更换和无功配置协同优化的配电网节能改造模型以年总支出费用最小为目标函数, 即

$$\min f = \mu W_1 + W_C \quad (1)$$

式中:  $\mu$  为投资的年回收率(%);  $W_1$  为导线更换和新增各种无功补偿设备的总投资;  $W_C$  为配电网的年网损费用。具体的,

$$W_1 = W_L + (W_{MD} + W_{MF} + W_{LD} - W_{M0}) \quad (2)$$

式中:  $W_L$  为导线更换投资;  $W_{MD}$  和  $W_{MF}$  为中压侧动态分组补偿和固定补偿投资;  $W_{LD}$  为配变低压侧动态分组补偿投资;  $W_{M0}$  为中压固定补偿和分组补偿安装在相同地点合并为一套装置时节省的投资。其中,  $W_L$  由线路改造长度和单位距离材料及施工造价决定;  $W_{MD}$ 、 $W_{MF}$ 、 $W_{LD}$  分别由相应无功补偿装置单价、容量和累计安装费决定。

配电网的年网损费用计算方法为:

$$W_C = \beta \sum_{d \in N_d} (\tau_d \Delta P_d) \approx \beta [\tau_{\max} (\Delta P_L + \Delta P_{Cu}) + T_1 \Delta P_{Fe} + T_c \Delta P_c] \quad (3)$$

式中:  $\beta$  为电能单价;  $N_d$  为负荷水平周期集;  $\tau_d$  是

一年内负荷水平  $d$  的等效小时数;  $\Delta P_d$  为负荷水平  $d$  期间配电网的总有功损耗;  $\tau_{\max}$  是最大负荷损耗小时数;  $T_1$  为配变年运行小时数;  $T_c$  为电容器年投运时间;  $\Delta P_L$ 、 $\Delta P_{Cu}$ 、 $\Delta P_{Fe}$ 、 $\Delta P_c$  分别为最大负荷方式下的 10 kV 配电线路损耗、配变负载损耗(铜损)、配变空载损耗(铁损)、电容器损耗。

### 1.2 约束条件

本文的约束条件包括以下几个方面:

#### (1) 潮流方程约束

$$\Delta P_i = P_i^s - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (4)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^s - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (5)$$

式(4)~(5)中:  $\Delta P_i$ 、 $\Delta Q_i$  为节点  $i$  的有功功率不平衡量和无功功率不平衡量;  $P_i^s$ 、 $Q_i^s$  为节点  $i$  注入的有功功率和无功功率;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  分别为节点  $i$  和节点  $j$  之间的电导、电纳;  $N$  为配电网节点总数。

#### (2) 节点电压与无功配置约束

$$V_{\min, k} \leq V_k \leq V_{\max, k} \quad k \in N_A \quad (6)$$

$$Q_{\min, k} \leq Q_k \leq Q_{\max, k} \quad k \in N_M \cup N_L \quad (7)$$

$$\sum Q_{F, m} \leq Q_{L\min} \quad m \in N_M \quad (8)$$

式(6)~(8)中:  $N_A$ 、 $N_M$ 、 $N_L$  分别为所有节点集、中压无功补偿节点集和低压无功补偿节点集;  $V_{\min, k}$  和  $V_{\max, k}$  为节点  $k$  的电压幅值  $V_k$  的允许下限和上限;  $Q_k$  为无功补偿节点  $k$  处分组自动投切补偿容量;  $Q_{\max, k}$ 、 $Q_{\min, k}$  为按补偿功率因数的要求或装设补偿容量的资金要求而定出的分组投切补偿容量上限和下限;  $Q_{F, m}$  为中压无功补偿节点  $m$  处的固定补偿容量;  $Q_{L\min}$  为配电线路的最小无功功率负荷, 约束(8)是为了保证杆上固定补偿后轻载期间馈线不会出现无功倒送。

#### (3) 补偿设备安装维护约束

由于 10 kV 无功补偿一般安装在线路杆塔上, 存在维护检修工作量大以及环境制约等问题, 线路中压补偿的点数不宜过多<sup>[9]</sup>, 一般不超过 2~3 个点, 从而有,

$$\sum_{m \in N_M} (\alpha_{F, m} + \alpha_{D, m} - \alpha_{D, m} \alpha_{F, m}) \leq n_{M\max} \quad (9)$$

式中:  $\alpha_{F, m}$ 、 $\alpha_{D, m}$  分别为中压侧节点  $m$  是否安装固定补偿或动态分组补偿的逻辑变量;  $n_{M\max}$  为中压馈线上最大补偿点数。

#### (4) 导线更换约束

对线路的导线改造首先需满足更换的线径不小于当前线径或有关导则要求, 也不宜过大, 应在线路走廊限制或杆塔承受允许范围内, 如式(10)。此外, 更换后的线路结构应防止出现“卡脖子”现象,

即某段流过电流大的导线线径比下一段流过电流小的导线线径小, 因此必须采用一定的方法来规避这种情况的出现。本文采取的方法是在配电网进行潮流计算后, 按电流由大到小对各段导线线径进行排序(参考图 1), 要求其满足式 (11)。

$$D_{\min, k} \leq D_k \leq D_{\max, k} \quad (10)$$

$$I_k \geq I_{k+1} \cap D_k \geq D_{k+1} \quad 1 \leq k < n_L \cap k \in Z^+ \quad (11)$$

式中:  $D_k$ 、 $D_{\min, k}$ 、 $D_{\max, k}$  分别为第  $k$  段导线所选更换线径、最小考虑更换线径、最大考虑更换线径;  $I_k$  为第  $k$  段导线的负载电流;  $n_L$  为配电线路导线分段数。

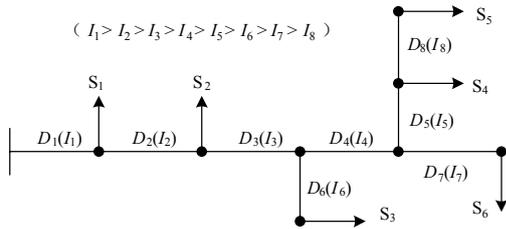


图 1 典型配电线路

Fig.1 A typical distribution feeder

## 2 模型去约束处理与优化算法

可见, 配电网节能改造优化是一个混合整数非线性规划问题, 变量多且目标函数式和约束表达式不可微, 求解难度非常大, 为此首先应考虑如何进行去约束处理。在很多非线性优化问题中, 将不等式约束作为惩罚项加到目标函数中构成扩展目标函数, 这是化解本文复杂约束的一个有效的思路。从而在改进模型中, 分组补偿容量和导线线径上下限作为自约束的控制变量, 而 PQ 节点电压幅值约束、固定补偿容量约束、10 kV 馈线上补偿点数约束和导线线径其他约束则可转化为惩罚项加到目标函数中。

$$\min F = f + P(V) + P(Q_f) + P(n) + P(D) \quad (12)$$

其中,

$$P(V) = \lambda_V \max_{k \in N_{PQ}} (|V_k - S(V_k)|) \quad (13)$$

$$P(Q_f) = \lambda_F C \left( \sum_{m \in N_M} Q_{F,m} - Q_{L,\min} \right) \quad (14)$$

$$P(n) = \lambda_n C \left[ \sum_{m \in N_M} (a_{F,m} + a_{D,m} - a_{F,m} a_{D,m}) - n_{M,\max} \right] \quad (15)$$

$$P(D) = \lambda_D \sum_{k=1}^{n_L-1} C(D_{k+1} - D_k) \quad (16)$$

式中:  $S(x)$ 、 $C(x)$  分别为饱和函数和截断函数;  $\lambda_V$ 、 $\lambda_F$ 、 $\lambda_n$ 、 $\lambda_D$  是惩罚因子。

本文采用灾变遗传算法来求解导线更换和中低压无功配置的优化问题<sup>[10-12]</sup>。结合模型特点采用了

分组整数编码方式。具体编码如图 2 所示。

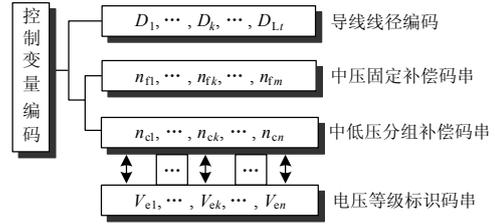


图 2 编码方案

Fig.2 Encoding scheme

图 2 中,  $D_1, \dots, D_{L_i}$  为导线线径编码;  $n_{f1}, \dots, n_{fm}$  为 10 kV 中压固定补偿码串;  $n_{c1}, \dots, n_{cn}$  为 10 kV/0.4 kV 中低压分组补偿码串;  $V_{e1}, \dots, V_{en}$  为电压等级标识码串。

## 3 算例分析

以某地区的配电线路改造为例, 分别计算各种改造方案的效益。该配电线路的供电半径较长, 在改造前, 各节点电压普遍较低, 系统有功网损较大, 线路的拓扑结构如图 3 所示, 常用导线的经济电流密度如表 1 所示, 导线以及配变的情况如表 2 和表 3 所示, 改造方案如表 4, 其中, 专用变由用户自身补偿后负载功率因数大部分在 0.90 以上, 公用变负载功率因数则一般在 0.85~0.90 之间。在进行配电线路优化改造的时候必须适当考虑未来负荷的增长, 根据该地区相关的负荷预测, 假定该线路的负荷增长为 20%, 效益对比如表 5 所示。

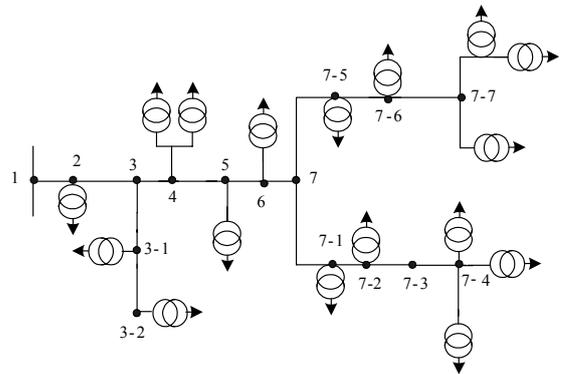


图 3 配电线路拓扑结构

Fig.3 Topological structure of distribution lines

表 1 常用导线的经济电流密度

Tab.1 Economic current density of common lines

导线材料	年最大负荷利用小时		
	3 000 以下	3 000~5 000	5 000 以上
铜	3	2.25	1.75
铝	1.65	1.15	0.9

表 2 10 kV 线路信息

线路	导线型号	长度/km
主馈线 N1-N7	LGJ-150	4.27
主馈线 N3- N3-2	LGJ-50	0.21
主馈线 N7- N7-3	LGJ-50	0.38
主馈线 N7- N7-7	LGJ-50	0.63
其余线路	LGJ-35	2.31

表 3 配电变压器信息

配变容量/KVA	台数		配变容量/kVA	台数	
	公用变	专用变		公用变	专用变
S9-400	1	—	S11-315	1	—
S9-500	4	1	S11-500	3	2
S9-630	1	—	S11-630	3	1

表 4 改造方案

Tab.4 Modification scheme

改造方案	导线更换			无功补偿 (点数/kvar)			
	线路	原导线型号	更换导线型号	长度/km	高压固定	高压分组	低压分组
方案一: 按经济电流密度进行导线更换	主馈线 N1- N3	LGJ-150	LGJ-240	3.25			
	主馈线 N3- N5	LGJ-150	LGJ-185	0.20	—	—	—
	主馈线 N7- N7-2	LGJ-50	LGJ-70	0.28			
	主馈线 N7- N7-6	LGJ-50		0.13			
方案二: 中低压无功补偿	—	—	—	—	1\150	—	14\1755
方案三: 导线与中低压无功配置协同节能规划	主馈线 N1- N6	LGJ-150	LGJ-300	3.5			
	主馈线 N7- N7-1	LGJ-50	LGJ-150	0.15			
	主馈线 N7- N7-5			0.1	1\150	—	13\1540
	主馈线 N7-5- N7-6	LGJ-50	LGJ-95	0.03			
	主馈线 N7-1- N7-3			0.23			
	主馈线 N7-3- N7-4	LGJ-35	LGJ-95	0.15			

表 5 不同方案的改造效益对比

Tab. 5 Benefits comparison of different schemes

比较项目	馈线有功/kW	负荷有功/kW	网损/kW	网损率/%	投资费/万元	投资回收期/年
改造前	4 314.85	4 109.72	205.13	4.75	—	—
方案一	4 251.88	4 109.72	142.16	3.34	53.81	4.10
方案二	4 266.83	4 109.72	157.11	3.68	30.03	3.05
方案三	4 206.13	4 109.72	96.40	2.29	95.84	4.27

由表 5 可见, 若仅按经济电流密度进行导线更换或仅进行中低压无功配置, 线路的网损率有所下降, 但降损效益不明显, 仅按经济电流密度进行导线更换时, 如果负荷过重, 会导致线路末端电压偏低, 另外网损还有下降的空间。虽然仅进行中低压无功配置的投资回收期最短, 但是, 其降损效益未能充分挖掘。如果将导线更换和中低压无功配置协同优化后, 更换导线的线径虽比按经济电流密度更换的线径大, 但是降损效益明显, 降损空间得到充

分的挖掘, 比改造前降低了 50%以上, 虽然投资费用较多, 投资回收期较长, 但是相对于前两种改造方案的效益和回收期, 其技术经济性最好。

## 4 结论

在配电网的节能改造中, 仅进行导线更换或仅进行中低压无功配置的降损效益一般, 降损空间未能得到充分地挖掘, 将导线更换与中低压无功配置协同优化后将能充分地挖掘配电网的降损空间, 取

得良好的降损效益。本文提出的导线更换与中低压无功配置协同优化的配电网节能改造优化模型能够很好地实现两种技术手段的综合优化。算例很好地证明了该模型可以更加全面地实现配电线路的优化改造,对配电网的节能降耗改造具有重要的实用价值。

**参考文献**

[1] Teng Jen-Hao, Chang Chuo-Yean. A network-topology-based capacitor control algorithm for distribution systems[C]//IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Asia Pacific: 2002: 1158-1163.

[2] 雷铭. 电力网降损节能手册[M]. 北京:中国电力出版社, 2005.

[3] 卢志刚, 李爽, 等. 配电网技术经济运行区域的研究及应用[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 156-159.  
LU Zhi-gang, LI Shuang, et al. Study on technical economic operation area of the distribution network [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 156-159.

[4] 苗培青, 江秀友. 配电网等值电阻  $R_d$  与技术改造探讨[J]. 中国电力, 2002, 35(2): 67-69.  
MIAO Pei-qing, JIANG Xiu-you. Discussion on equivalent resistance  $R_d$  and technology transformation for distribution system [J]. Electric Power, 2002, 35(2): 67-69.

[5] 胡海燕, 武晓朦, 刘健. 基于遗传算法的配电网低压侧无功补偿动态优化规划[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(3): 25-29.  
HU Hai-yan, WU Xiao-meng, LIU Jian. Genetic algorithm based optimal dynamic planning of low-voltage side reactive power compensators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(3): 25-29.

[6] 张勇军, 任震, 廖美英, 等. 10 kV 长线路杆上无功优化补偿[J]. 中国电力, 2000, 33(9): 50-52.  
ZHANG Yong-jun, REN Zhen, LIAO Mei-ying, et al. Optimal reactive compensation on tower of 10 kV long distribution feeder[J]. Electric Power, 2000, 33(9): 50-52.

[7] 任晓娟, 邓佑满, 赵长城, 等. 高中压配电网动态无功优化算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 31-36.  
REN Xiao-juan, DENG You-man, ZHAO Chang-cheng,

et al. Study on the algorithm for dynamic reactive power optimization of distribution systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 31-36.

[8] 刘伟良, 黄纯, 向为. 基于线性内点法的高中压配电网电压无功优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(6): 82-87.  
LIU Wei-liang, HUANG Chun, XIANG Wei. Linear interior-point programming based voltage/reactive power optimization for high-medium voltage distribution networks [J]. Proceedings of EPSCA, 2004, 16(6): 82-87.

[9] 丁晓群, 王宽, 王斌, 等. 主馈线和分支线路相结合的配电网无功补偿[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(4): 11-14, 86.  
DING Xiao-qun, WANG Kuan, WANG Bin, et al. Distribution network var compensation considering both feeder and branches [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(4): 11-14, 86.

[10] ZHANG Yong-jun, REN Zhen. Optimal reactive power dispatch considering costs of adjusting the control devices[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(3): 1349-1356.

[11] ZHANG Yong-jun, LIAO Mei-ying, REN Zhen. Cataclysmic genetic algorithm for optimal reactive power dispatch comparing with an interior-point algorithm[C]// Proceedings of the 5th IASTED International Conference on Power and Energy Systems. Marina del Rey, CA(USA): 2005: 55-60.

[12] 张勇军, 任震, 钟红梅, 等. 基于灾变遗传算法的无功规划优化[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(23): 29-32.  
ZHANG Yong-jun, REN Zhen, ZHONG Hong-mei, et al. Cataclysmic genetic algorithms based optimal reactive power planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23): 29-32.

收稿日期: 2009-09-02

**作者简介:**

张勇军 (1973-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统优化规划与控制、可靠性和 HVDC 等研究; E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

陈超 (1985-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统优化规划与控制研究;

廖民传 (1983-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统无功优化和电压稳定。