

# 图形化低压电网线损计算与负荷优化配置软件开发

章健<sup>1</sup>, 马旭冰<sup>1</sup>, 程晓晓<sup>2</sup>, 贺芳<sup>3</sup>

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南电力试验研究院, 河南 郑州 450052; 3. 河南省电力公司新乡供电公司, 河南 新乡 453000)

**摘要:** 提出并研究了一种以 Microsoft Visio2003 图形软件为平台, 利用 VBA 进行二次开发的图形化电力系统低压电网线损计算与负荷优化配置软件编制的新技术和新的实现方法。为解决低压电网负荷三相平衡优化配置问题, 研究了负荷配置组合优化问题的数学模型。开发实践表明, Visio 的二次开发技术为图形化低压电网计算软件的开发提供了新的有效途径。

**关键词:** VisioVBA; 图形化开发; 低压电网线损; 三相不平衡

**中图分类号:** TM744 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2012.03.011

## 0 引言

电力网中配变台区数量众多, 对应的低压电网规模也很巨大, 由此可见低压电网的降损工作十分重要。我国低压电网一般采用三相四线制供电, 而其中存在的单相负荷往往造成三相负荷不平衡, 会使中性线存在较大电流, 导致线损增加。对负荷进行三相优化平衡, 只调整用户接入相, 在并不额外增加投资的情况下, 能有效减小不平衡度, 使网损显著下降, 该方法是一种简单经济的降损方法, 并且对低压电网的电能质量、设备利用率、中性点偏移等情况均有积极的意义<sup>[1]</sup>。

目前在实际工作中还主要是凭经验解决负荷三相平衡的问题, 平衡的效果依赖于技术人员的专业素质和对具体电网的熟悉程度, 缺乏严格的数学描述与理论指导, 并且也缺少解决问题的软件平台的支持, 完全靠人工方法进行负荷三相平衡, 工作量大, 效率低, 降损效果难以保证。笔者采用引入不平衡度的低压电网线损计算方法, 研究了低压电网负荷三相平衡优化配置的数学模型, 利用 Microsoft Visio2003 VBA 二次开发技术, 开发出一款图形化的低压电网线损计算与负荷优化配置软件, 以满足低压电网线损计算、分析和降损措施制定的需要。

## 1 线损计算与负荷优化配置的数学模型及算法

### 1.1 线损、不平衡度计算的数学模型

负荷电流不平衡度  $\lambda$  以及 A, B, C 三相的不平衡度  $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$  的定义为

$$\lambda = I_{\max} / I_{\text{av}} \times 100\%; \quad (1)$$

$$\lambda_A = (I_A - I_{\text{av}}) / I_{\text{av}} \times 100\%; \quad (2)$$

$$\lambda_B = (I_B - I_{\text{av}}) / I_{\text{av}} \times 100\%; \quad (3)$$

$$\lambda_C = (I_C - I_{\text{av}}) / I_{\text{av}} \times 100\%. \quad (4)$$

式中:  $I_{\max}$  为最大偏差相负荷电流,  $I_{\max} = \max(|I_A - I_{\text{av}}|, |I_B - I_{\text{av}}|, |I_C - I_{\text{av}}|)$ ;  $I_A, I_B, I_C$  分别为 A, B, C 相负荷电流;  $I_{\text{av}}$  为平均负荷电流,  $I_{\text{av}} = (I_A + I_B + I_C) / 3$ 。

第  $l$  段线路的有功损耗为<sup>[2]</sup>

$$\Delta P_l = (3 + \lambda_{Al}^2 + \lambda_{Bl}^2 + \lambda_{Cl}^2) I_{\text{avl}}^2 R_l + (\lambda_{Al}^2 + \lambda_{Bl}^2 + \lambda_{Cl}^2 - \lambda_{Al} \lambda_{Bl} - \lambda_{Al} \lambda_{Cl} - \lambda_{Bl} \lambda_{Cl}) I_{\text{avl}}^2 R_{0l} \quad (5)$$

式中:  $I_{\text{avl}}$  为第  $l$  段线路平均负荷电流;  $\lambda_{Al}, \lambda_{Bl}, \lambda_{Cl}$  为第  $l$  段线路三相不平衡度;  $R_l$  为第  $l$  段线路相线电阻;  $R_{0l}$  为第  $l$  段线路中性线电阻。

设线段的总数为  $L$ , 那么低压电网总线损为

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_{l=1}^L \Delta P_l \quad (6)$$

低压电网的导线型号、长度一般不易得到, 这里引入总不平衡度  $\lambda_{\Sigma}$  的概念, 在缺少基础数据

收稿日期: 2012-01-13; 修订日期: 2012-03-01

作者简介: 章健(1963-), 男, 福建福州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事电力系统运行与分析 and 电力系统辨识方向的研究, E-mail: hnpowersoft@tom.com.

时,作为线损优化的一个辅助.总不平衡度为

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^L \lambda_i \quad (7)$$

式中: $\lambda_i$ 为第*i*段线路负荷电流不平衡度.

### 1.2 线损、不平衡度计算的算法

低压电网中常得到的是用户的用电量,利用用电量可以求出节点注入电流 $I_n$ .下面根据 $I_n$ 推导第*i*段线路电流 $I_{Ai}, I_{Bi}, I_{Ci}$ 的计算机算法.

#### 1.2.1 0-1 逻辑变量的引入

低压电网的结构由于三相四线、三相三线、单相两线等接线形式的存在而不再保持对称.以单相负荷接入A相为例,如图1所示,可看出电网结构的三相不对称被破坏.为使程序易于实现,作等值处理(加虚线部分),令 $I_B = I_C = 0$ ,电网结构变为对称.

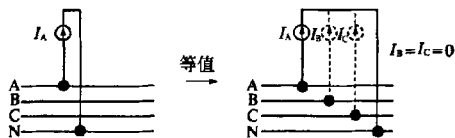


图1 负荷等值示意图

Fig.1 Load equivalent schemes

引入0-1逻辑变量代表负荷接入相序,使各种接线情况下保持对称,也就是支路-结点关联矩阵 $M^{[3]}$ 不变.

设负荷接入线路A,B,C三相所对应的0-1逻辑变量组成的向量分别为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_A = [x_{A1} & x_{A2} & \cdots & x_{AN}]^T \\ \mathbf{x}_B = [x_{B1} & x_{B2} & \cdots & x_{BN}]^T \\ \mathbf{x}_C = [x_{C1} & x_{C2} & \cdots & x_{CN}]^T \end{cases} \quad (8)$$

式中: $x_i (i=1,2,\cdots,N)$ 为0-1逻辑变量,对应负荷接入相序, $x_{Ai}=1$ 表示第*i*个负荷接入A相, $x_{Ai}=0$ 表示第*i*个负荷不接入A相, $x_{Bi}, x_{Ci}$ 同理.

当第*i*个负荷为三相负荷时,应满足 $x_{Ai} = x_{Bi} = x_{Ci} = 1$ ;当第*i*个负荷为单相负荷时,应满足 $x_{Ai} + x_{Bi} + x_{Ci} = 1$ .

#### 1.2.2 线损、不平衡度计算

线段电流 $I_{Ai}, I_{Bi}, I_{Ci}$ 可通过支路-结点关联矩阵 $M$ ,解下述线性方程组得到.

$$\begin{cases} M I_{Ai} = I_{An} \\ M I_{Bi} = I_{Bn} \\ M I_{Ci} = I_{Cn} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} I_{An} = [x_{A1}I_1 & x_{A2}I_2 & \cdots & x_{AN}I_N]^T \\ I_{Bn} = [x_{B1}I_1 & x_{B2}I_2 & \cdots & x_{BN}I_N]^T \\ I_{Cn} = [x_{C1}I_1 & x_{C2}I_2 & \cdots & x_{CN}I_N]^T \\ I_n = [I_1 & I_2 & \cdots & I_N]^T \end{cases} \quad (10)$$

式中: $I_{An}, I_{Bn}, I_{Cn}$ 分别为节点注入A、B、C相电流向量; $I_{Ai}, I_{Bi}, I_{Ci}$ 分别为A、B、C三的各电流向量; $I_n$ 为节点注入电流向量.

将求得的线段电流代入公式(1)~(4),可求出各段线路的相不平衡度,再由式(5)解出各段线路的线损,最终根据式(6)得到总线损.与上相似,由各段线路的负荷电流不平衡度代入式(7)可求出总不平衡度.

### 1.3 负荷优化配置的数学模型

本文的负荷优化配置问题为:在导线型号、长度、负荷分布、电量等参数均已确定的前提下,优化调整单相负荷接入低压电网的相序,减少负荷的不平衡度,从而降低线损.

由前述公式(1)~(10)可分析出,就负荷优化配置问题而言, $\Delta P_i$ 为三相负荷相序逻辑变量的函数,记为 $\Delta P_i(x_{Ai}, x_{Bi}, x_{Ci})$ .

基于线损优化的单相负荷优化配置的目标函数和约束条件为

$$\begin{aligned} \text{obj. min } \Delta P_{\Sigma} &= \sum_{i=1}^L \Delta P_i(x_{Ai}, x_{Bi}, x_{Ci}); \quad (11) \\ \text{s. t. } &\begin{cases} x_{Ai} + x_{Bi} + x_{Ci} = 1, i = 1, 2, \cdots, N; \\ x_{Ai}, x_{Bi}, x_{Ci} = 1 \text{ 或 } 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\min \Delta P$ 为低压电网优化线损.

式(11)表示通过单相负荷相序的变化,算出相应线损,进行比较,求优化线损.此问题实际是个0-1组合优化问题,本软件采用启发式的方法来解决这样一个非线性组合优化问题,计算出优化线损以及优化配置方案.

基于不平衡度优化的单相负荷优化配置的目标函数和约束条件与式(11)、(12)基本相似,不再赘述.

## 2 开发平台介绍

### 2.1 模具的开发

Visio2003是一款通用的绘图软件,利用其VBA二次开发技术与专业计算程序相结合,开发人员可以方便地实现程序的可视化功能<sup>[4]</sup>.利用Visio软件设计电网元件模具的过程十分简单.先在绘图区内绘制低压电网电气接线图所需图件.

图件制作时,应增加和定义其 ShapeSheet 中的用户属性 CustomProperties 区,如单相线路图件的属性可定义为首端节点 i、末端节点 j、导线型号、导线长度、所属相序等,并可给图件添加连接点,连接点用于程序中低压电网拓扑结构的自动识别<sup>[5]</sup>. 然后为图件设置属性,使图件和其表示的电气设备的数据关联起来,把数据与图件绑定在一起,即该图件所代表设备的参数存放在用户属性 CustomProperties 区中. 最后将完成的图件用鼠

标拖拽到一个新模具中即可,这样就生成了一个包含许多低压电网绘图符号的模具供绘图时使用. 软件提供了配变台区、三相线路、单相线路、三相负荷、单相负荷等模具.

## 2.2 窗体的设计

窗体的主要功能是提供人机交互式的界面,用户可通过窗体实现对 ShapeSheet 中用户属性 CustomProperties 区数据的存取和修改<sup>[6]</sup>. Visio 引擎具有多种触发和响应事件的方式,可以通过定义图件 ShapeSheet 表中 Events 区的双击事件 EventsDoubleClick 实现双击图形出现窗体的功能. 另外,也可以设置将鼠标放置在图形上单击右键显示窗体事件的形式,方法就是在 ShapeSheet 表中定义 Actions 区.

## 3 计算实例

以某县某 400 V 典型低压台区为例,线损计算和负荷优化配置结果如图 3 所示. 图中单相线路损失电量、线损率以及优化后的损失电量、线损率均直接显示在所绘制图形中. 通过计算的优化相序显示在单相线路的上方或左侧.

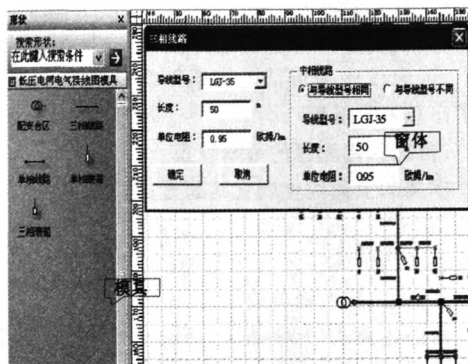


图 2 模具与窗体参数输入

Fig. 2 The die and parameter input-in form

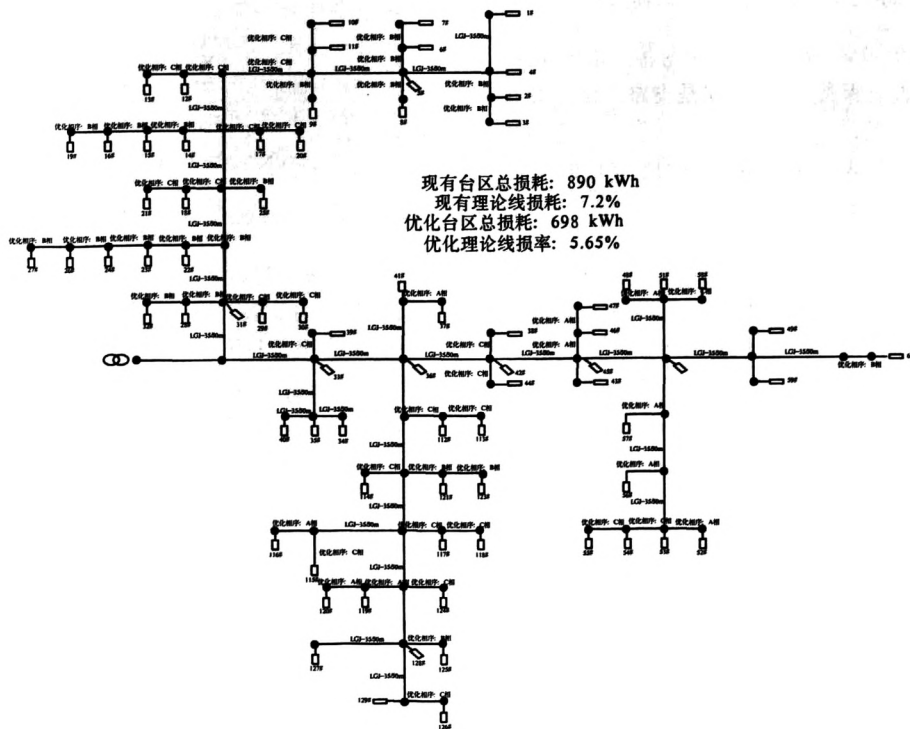


图 3 计算结果显示

Fig. 3 Calculation results

从结果看,优化前后降损效果比较明显,月降损约 192 kWh. 理论计算结果与实测值相差不大,满足精度要求,见表 1.

表 1 线损与优化计算结果

Tab.1 Line loss and optimization calculation results

方法	线损/kWh	线损率/%
理论计算结果	890	7.20
优化计算结果	698	5.65
实测结果	1 030	8.33

根据所得优化方案,该县对计算台区单相负荷进行重新调整.调整后次月供电量与上月基本持平,线损较上月下降 161 kWh,见表 2.本台区一年降损约 1 932 kWh,电费按 0.5 元/kWh 计,则一年降损节省 966 元.考虑到该县有台区 1 230 个,平均降损参照本例,则全县一年降损节省约 119 万元,效益相当可观.

表 2 线损与优化计算结果

Tab.2 Line loss and optimization calculation results

方法	线损/kWh	线损率/%
优化计算结果	739	5.98
上月实测结果	1030	8.33
优化改造后实测结果	869	7.03

#### 4 结论

笔者所研究的低压电网线损、不平衡度计算数学模型,充分考虑了低压电网的特点,计算精度

高,易于程序实现,运算量小.并将负荷优化配置问题转化为 0~1 变量的组合优化问题,采用了启发式算法,能够给出符合工程实际的较优解.通过对实际电网的计算,表明模型与算法正确、效果好.

同时,提出了一种在 Visio2003 平台上开发低压电网线损、不平衡度计算及负荷优化配置的图形化软件的新技术.软件操作简单方便,人机界面友好,结果显示直观,能自动生成计算结果报表,是一款实用化的软件.

#### 参考文献:

- [1] 吴建宾,周文波.三相负荷不平衡对低压供电系统的影响[J].农村电气化,2002(2):42.
- [2] 邵俊琴.三相不平衡线路的线损分析[J].电力学报,2001,16(2):92-93.
- [3] 张洪波.配电线路无功补偿优化配置的研究与图形化软件开发[D].郑州:郑州大学电气工程学院,2006.31-32.
- [4] 贺芳,高建保,章健.电网规划软件总体设计及开发[J].微计算机信息,2011,27(7):244-246.
- [5] 郭伟伟,张峰,章健.Visio 图形化电力计算软件中电网拓扑结构的识别[J].河南科学,2006,24(6):889-891.
- [6] 美国 Microsoft 公司.开发 Microsoft Visio 解决方案[M].莱恩工作室,译.北京:北京大学出版社,2002.

### Development of Graphic Low Voltage Line Loss Calculation and Load Optimized Strategy Software

ZHANG Jian<sup>1</sup>, MA Xu-bing<sup>1</sup>, CHENG Xiao-xiao<sup>2</sup>, HE Fang<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 3. Henan Xinxiang Power Supply Company, Xinxiang 453000, China)

**Abstract:** A new method of developing the low voltage line loss calculation and load optimized strategy software are proposed, in which Microsoft Visio2003 is used as development platform and VBA is used as secondary development tools. In order to optimize low voltage load, the combinatorial optimization model which is employed to determine the scheme of three-phase balance load strategy is studied in this paper. The development of this software indicates that the technique of secondary development for Visio provides a new effective method for the development of the graphic low voltage network calculation software.

**Key words:** Visio VBA; graphic development; low voltage network line loss; three phase imbalance