

DOI: 10.7667/PSPC150705

低压配电网无功补偿及效益评估系统的开发和应用

张海鹏¹, 林舜江¹, 刘明波¹, 黄晓彤²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510620)

摘要: 为了方便、快捷、准确地计算出低压配电网的无功补偿配置方案, 评估补偿方案的效益, 协助电网运行管理人员选择经济适用的无功补偿方案, 采用 Access 关系型数据库管理系统、Visual Basic 6.0 可视化开发工具, 开发了一个低压配电网无功补偿及效益评估系统。该系统具有直观、友好的人机交互界面, 提供了多种配电网潮流计算方法和无功补偿优化配置计算方法, 以及对不同补偿方案进行成本和效益的评估计算。系统还提供了直观的图形接口由电网运行人员输入新规划建设低压配电网台区信息, 并计算出该台区的无功分散补偿优化配置方案。应用该系统于广州市南沙区实际低压配电网台区, 表明了系统使用方便, 能够可靠获得台区的实用无功分散补偿优化配置方案。

关键词: 低压配电网; 无功补偿; 优化配置; 效益评估; 软件开发

Development of low voltage distribution networks reactive power compensation and benefit assessment system and its application

ZHANG Haipeng¹, LIN Shunjiang¹, LIU Mingbo¹, HUANG Xiaotong²

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510620, China)

Abstract: In order to quickly and accurately gain the reactive power compensation scheme, evaluate the benefits of compensation scheme in low-voltage network more conveniently, and help power grid operator and manager to determine the most economical and suitable reactive power compensation scheme, a reactive power compensation and benefit evaluation system of low-voltage network is developed, which uses the Access relational database management system and Visual Basic 6.0 development tools. This system provides the intuitional and friendly interface, various power flow calculation methods and optimal reactive power compensation calculation methods of low-voltage distribution network, as well as the cost and benefit evaluation calculation of different reactive power compensation schemes. In addition, intuitionistic graphical interfaces is provided for grid operator inputting the information of new program low-voltage distribution network, and calculating the distributed reactive compensation optimal allocation scheme of the low-voltage distribution network. This system has been applied to practical low-voltage distribution networks in Nansha district of Guangzhou city, and it shows that this system is convenient to use and can reliably gain the practical distributed reactive compensation optimal allocation scheme of the low-voltage distribution network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207056).

Key words: low voltage distribution network; reactive power compensation; optimal allocation of compensation equipment; benefit assessment; software development

0 引言

低压配电网是直接连接用户的供电环节, 也是电力网中分配、输送电能的重要环节。目前, 我国低

压配电网主要采用放射式网络结构, 整体上的特点是线路长且电阻与电抗比值大、负荷变化快、无功补偿配置不足, 进而导致线路损耗大、部分地区电压偏低^[1-2]。因而经常会出现配电馈线末端用户的感应电动机或照明光管无法正常起动, 给用户的正常生产和生活用电带来很大影响。合理地配置安装无功补

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51207056)

偿装置,对降低低压配电网网损,提高供电电压质量,保障配电网安全可靠运行,具有重要的作用^[3-4]。

对于低压配电网的无功补偿配置,需要解决的问题是在哪里安装、安装多大容量的无功补偿装置,这可通过建立和求解配电网无功补偿优化模型来实现,目前已形成了较为成熟的理论方法,并在实际电网中获得应用^[5-12]。文献[5]提出了一种应用于电力系统无功优化规划的突变遗传算法,提高了搜索效率,能够快速求出最优解;结合实际配电网的结构,文献[6]提出了一种适用于放射性配电线路的并联电容器优化配置方法;文献[7]提出了一种适用于含分支树状配电线路的并联电容器优化规划方法;文献[8]提出了配电网分支线路末端配电变压器低压侧和主馈线相结合的优化补偿方式,依据无功负荷的分布情况确定电容器补偿的最佳位置和补偿容量;文献[9]提出了在满足电压约束的条件下,先以所有负荷点为补偿点求解出理想的无功补偿分散优化配置方案,然后综合考虑投资费用和运行要求,求解出实用无功补偿分散配置优化方案。

然而,无功补偿优化计算往往涉及到复杂的数学计算,不便于电网运行管理人员的直观使用。电网运行人员往往要求只需输入所管辖电网的相关信息,即可快速确定存在电压质量问题的地区及相应的无功补偿配置方案,这就需要开发相应的配电网无功补偿优化配置软件。文献[13]介绍了基于全网无功优化的配电网无功优化系统的设计;文献[14]介绍了基于负荷统计与预测的农网配电台区无功补偿软件的设计方法。这些软件的功能设计着重于获得

无功补偿配置方案,缺少对不同无功补偿配置方案的成本和效益进行比较和评估。而对于数目众多的低压配电网台区,开发无功补偿优化配置及其效益评估软件,以指导配电网运行管理人员进行无功补偿配置决策,进而选择经济适用的无功补偿配置方案,无疑具有广阔的工程应用需求。

本文针对低压配电网台区的无功补偿优化配置问题,开发了配电网无功补偿及效益评估软件。该软件操作简便,具有友好的人机交互界面,能够提供多种无功补偿方案,并评估不同补偿方案的经济效益和电压质量效益,电网运行人员可通过对比分析,选择不同台区的经济适用的无功补偿配置方案。

1 评估系统的整体结构框架

低压配电网无功补偿及效益评估软件系统是基于 Windows XP 操作系统的应用软件。该软件以 Visual Basic 6.0 为开发工具,实现低压配电网的潮流计算、无功补偿优化配置和无功补偿效益评估等功能,并且具有友好的人机交互界面。

评估系统以每台 10 kV/0.4 kV 配电变压器所供电的低压配电线路作为一个台区,将每个台区的配变参数、线路接线和参数、负荷特性参数按照节点编号顺序存入 Access 数据库中。软件运行时,系统通过调用数据库中台区的各个支路和负荷参数在后台进行计算、分析和处理,然后将运算结果展示到软件界面上。整个评估系统大体分为 3 个部分:数据库系统、后台计算分析评估系统、前台展示系统,评估系统的模块组成和运行流程如图 1 所示。

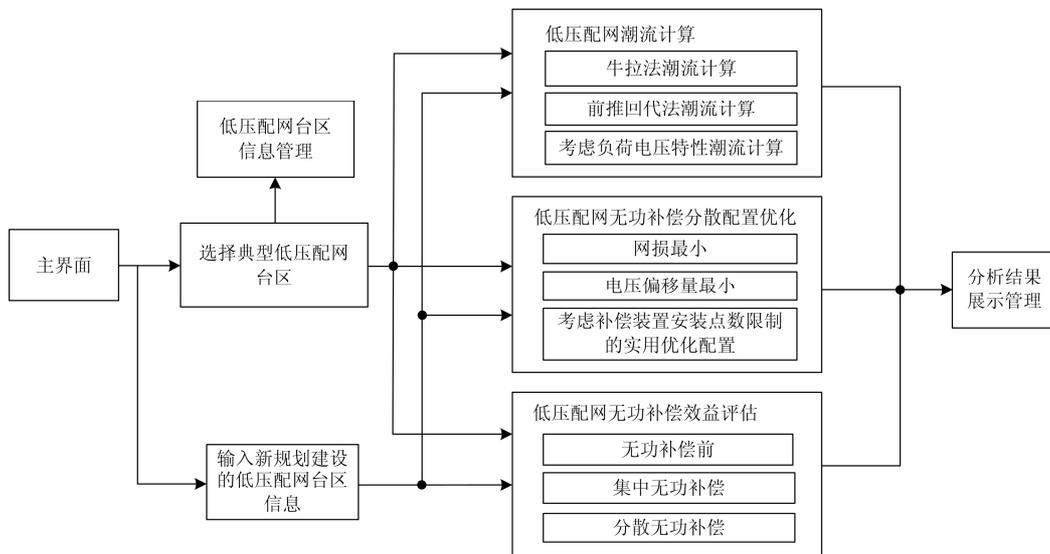


图 1 评估系统的模块组成和运行流程

Fig. 1 Module composition and operational procedure of the assessment software

1) 数据库系统

评估软件采用 Access 数据库存储各个台区的支路接线及参数和节点负荷参数, 各个台区的结构参数分别独立存储, 彼此之间互不联系, 便于调用和修改。每个台区的潮流计算结果、无功补偿优化配置结果和补偿效益评估结果也保存在 Access 数据库系统中, 同时展示到软件界面, 便于工作人员查询。

2) 后台评估分析系统

后台评估分析系统以 VB 编程语言作为开发工具, 软件运行时调用数据库系统的数据, 对配电网典型台区进行潮流计算和无功补偿效益的评估分析运算。此外, 考虑到配电网未来新建台区的需要, 后台评估分析系统还开发了新建台区的信息输入及无功分散补偿评估分析功能。后台分析系统主要包括以下功能模块:

- ① 低压配电网典型台区信息管理模块;
- ② 低压配电网典型台区潮流计算模块;
- ③ 典型台区无功补偿优化配置模块;
- ④ 典型台区无功补偿效益评估模块;
- ⑤ 新建台区无功分散补偿方案分析模块。

3) 前台展示系统

前台展示系统展示了各低压配电网典型台区的信息、潮流计算和无功分散补偿优化配置以及无功补偿效益评估的计算结果。在配电网典型台区信息模块中展示了该台区的结构和运行参数, 同时展示了该典型台区配电网的接线结构图; 在配电网典型台区潮流计算模块中展示了牛拉法潮流计算、前推回代潮流计算、考虑负荷电压特性的潮流计算的运行结果; 无功分散补偿优化模块中展示了网损最优、电压质量最优、实用分散无功补偿三种无功补偿配置优化计算的结果。此外, 前台展示系统还开发了数据存储功能, 可自动链接 Excel 以数据表格的格式导出存储相关的计算结果。

2 评估系统的主要功能模块

2.1 低压配电网典型台区信息管理模块

低压配电网台区的信息管理模块展示所选择典型台区的接线结构图、各个节点的节点编号, 系统通过调用 Access 数据库, 将该典型台区的线路结构参数和负荷运行参数信息展示到软件界面上的 MSHFlex Grid 控件中, 方便工作人员查看。此外, 当典型台区的线路参数和负荷参数发生变化时, 工作人员可以通过在界面表格中更改台区信息参数并存储到后台数据库中, 以适应该台区电网结构及用电负荷的变化。

2.2 低压配电网典型台区潮流计算模块

低压配电网中, 居民住宅类和圩镇类负荷台区的负荷比较稳定, 波动较小, 一般采用恒功率模型进行潮流计算。而对于鱼塘、虾塘等养殖业负荷, 含有大量的抽水泵、增氧泵等泵类负荷设备, 经常会出现由于电压过低而造成泵类负荷设备的感应电动机启动转矩过小而无法启动的现象^[15], 这类典型台区使用恒功率模型进行潮流计算时会造成较大的误差, 因此必须计及负荷的电压静态特性。

为适应电压配电网台区类型的多样性, 快速准确地进行潮流计算, 分析各个节点的电压和线路损耗, 系统开发的潮流计算模块, 包含了牛-拉法、前推回代法、考虑负荷的电压静态特性等潮流计算模块^[16-17]。牛顿拉夫逊法和前推回代法配网潮流计算可用于负荷较稳定采用恒功率表示的台区; 而考虑负荷特性的配网潮流计算, 主要是针对含有大量泵类负荷设备的低压配电网台区。

泵类负荷节点的等值电路如图 2 所示, 其中, \dot{V} 表示泵类负荷接入配电网处的节点电压; r_1 、 x_1 、 r_2 、 x_2 和 x_m 分别为感应电动机的定子电阻、定子电抗、转子电阻、转子电抗和激磁电抗; s 为感应电动机的转差率; K_H 为容量折算比, $K_H = S_B / S_{BM}$, S_B 为系统容量基准值, S_{BM} 为接入某一节点的泵类负荷感应电动机的总容量。

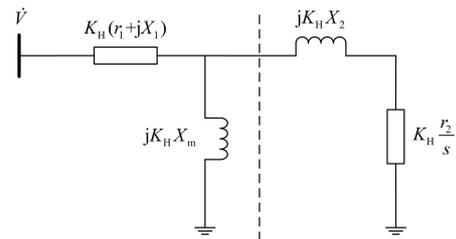


图 2 感应电动机接入系统时的稳态等值电路

Fig. 2 Steady state equivalent circuit of induction motor

对于含有泵类负荷节点, 潮流计算中除了列写该节点的功率平衡方程外, 还需要列写电动机转矩平衡方程, 如式(1)。

$$\begin{cases} K_L [a + (1-a)(1-s)^n] \frac{E_{eq}^2 K_H \frac{r_2}{s}}{(R_{eq} + K_H \frac{r_2}{s})^2 + (X_{eq} + K_H x_2)^2} = 0 \\ \Delta P_i = -\frac{V_i^2 R_m}{R_m^2 + X_m^2} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = -\frac{V_i^2 R_m}{R_m^2 + X_m^2} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： K_L 为电动机负载率； a 为机械负载中与转速无关部分所占的百分率； n 为负载指数； \dot{E}_{eq} 为图2中虚线左边部分进行戴维南等值后的等值电势， $R_{eq}+jX_{eq}$ 为等值阻抗； $R_{im}+jX_{im}$ 是感应电动机负荷的等值阻抗，是转差率 s 的函数，表达式参见文献[15]。对于每个泵类负荷节点，增加了转差率 s 一个变量，同时增加了一个电动机转矩平衡方程，可通过统一迭代法或交替迭代法求解考虑泵类负荷特性的配网潮流计算模型同时获得各个节点电压和转差率^[15]。

潮流计算模块以VB编程语言为开发工具，软件运行时，潮流计算模块调用数据库中台区的支路和负荷参数，经后台运算分析后，将计算结果显示到界面上MSHFlex Grid控件形成的表格中，同时将电压值在合格范围(额定电压的0.9%~1.07%)外的节点的电压值标记为红色，给电网运行人员以直观清晰的提醒。

2.3 低压配电网台区无功分散补偿优化配置模块

目前低压配电网无功补偿主要采用集中补偿方式，一般选择在线路的首端、中端、末端或距离首端2/3的位置作为补偿装置的安装点，集中补偿方式安装简单，运行维护方便，但对于供电距离较长的馈线，容易引起首端电压过高，而末端电压过低的现象。显然，对低压配电网采用分散补偿的方式，在负荷点附近分散安装无功补偿装置，尽量实现无功的就地平衡，减少配电网中由无功传输引起的电压损耗，能够更有效地解决各种类型台区的电压质量问题。分散补偿方式的装置安装点数较多，运行管理的工作量大，但补偿效果较好，台区无功分散补偿优化配置模块通过优化计算来获得存在电压质量问题台区的无功分散补偿配置方案。

配电网的无功补偿优化配置不但要保证各负荷节点的电压偏移符合相关规定的要求，而且要尽量降低配电网网损，以及降低补偿装置的投资费用，以提高经济效益。为此，系统开发的无功补偿分散优化配置模块，分别以配电网网损最小和电压偏移量最小为目标进行无功优化计算。此外，无功优化方案实际应用时，由于受到运行维护管理和安装位置的限制，分散无功补偿的安装点不宜过多，为此该模块开发了能够考虑无功补偿装置安装点数限制的实用分散无功补偿优化配置功能，能够获得安装点数符合实际要求的无功补偿分散配置方案。

软件运行无功分散补偿优化配置模块后，在界面展示无功优化配置后台区的总网损和各负荷节点电压偏移的平方和两个目标值，以及各节点所需配置的无功补偿容量和补偿后的电压。

2.4 无功补偿效益评估模块

无功补偿效益评估模块具有计算低压配电网台区无功补偿前、集中无功补偿后以及分散无功补偿后的直接经济效益和间接经济效益的功能，包括计算无功补偿设备的全生命周期(LCC)成本、电压合格率、网损、网损电费、停电损失费用、停电处理费用以及总经济损失等指标^[18]。

无功补偿的直接经济效益可由降低网损获得的经济效益减去无功补偿装置的投资费用得到。降低网损的经济效益等于网损降低的功率值乘以装置运行的寿命周期。无功补偿装置的投资费用是基于LCC成本的思想来计算的，主要包括无功补偿初始成本、运行成本费、维护成本、故障成本、废弃成本等费用，无功补偿装置的LCC成本计算如式(2)。

$$L_{CC} = C_k + \sum_{t=0}^{T-1} C_0 \times PV_{sum} + \sum_{t=0}^{T-1} C_m \times PV_{sum} + \sum_{t=0}^{T-1} C_f \times PV_{sum} + C_d \times PV_{sum} \quad (2)$$

式中： T 为补偿装置的寿命周期； C_k 、 C_0 、 C_m 、 C_f 和 C_d 分别为装置的初始投资成本、年运行成本、年维护成本、年故障成本和废弃成本； PV_{sum} 为装置年度投资费用的现值，计算公式如式(3)。

$$PV_{sum} = \begin{cases} \left(\frac{1+r}{1+R}\right)^t & \text{运行成本、维护成本、故障成本} \\ \left(\frac{1+r}{1+R}\right)^{T-1} & \text{废弃成本} \end{cases} \quad (3)$$

式中： r 为通货膨胀率； R 为社会贴现率； t 为成本发生时间。

无功补偿的间接经济效益主要是指补偿后由于电压质量改善使用户停电次数减少而带来的经济效益，停电费用主要包括停电赔偿费、停电处理费、停电电量损失费等。

2.5 新规划建设台区无功分散补偿分析

为了满足未来配电网发展中规划建设台区的需要，评估系统开发了新建台区的无功分散补偿方案分析模块。该模块提供了直观的图形接口由电网运行人员输入新规划建设台区的相关信息，并计算出该台区的无功分散补偿优化配置方案。该模块由三部分构成：台区信息输入、潮流计算和无功分散补偿方案计算。新规划建设台区无功分散补偿方案分析模块的程序流程图如图3所示。

台区信息输入界面先让用户选择输入新规划建设台区的配变型号和低压馈线数目，进而展示图形

化的台区网架结构让用户直观输入各个支路的长度、截面积和各个负荷点的功率或电量及功率因数,

系统会将台区信息存储到 Access 数据库中, 以便分析计算程序调用。为方便电网工作人员灵活选择无功补偿装置安装点, 无功补偿分散补偿分析界面提供了多个节点号输入框, 当选择某节点作为无功补偿装置安装点时, 通过系统后台程序分析计算出相应节点所需配置的无功补偿容量, 显示到界面上。

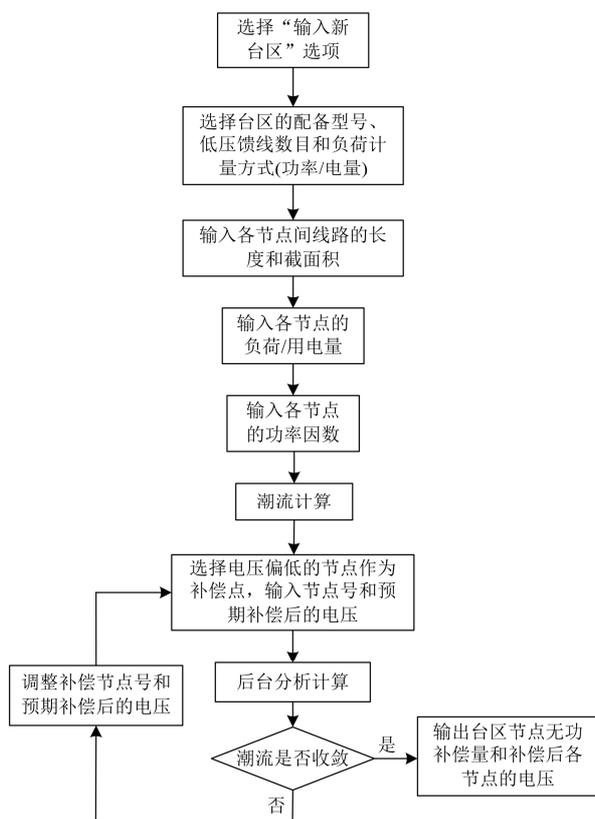


图 3 新规划建设台区的无功分散补偿分析流程图

Fig. 3 Distributed reactive compensation analysis flowchart of new program low voltage distribution network

3 评估系统的运行分析

将无功补偿及效益评估系统应用于广州市南沙区低压配电网中三类典型台区的实例分析, 包括农业灌溉、农村住宅和城镇住宅类台区。

3.1 典型台区的运行实例

以农业灌溉类负荷台区为例, 软件无功补偿优化配置和效益评估模块的计算结果如图 4、图 5 所示。

可以看出, 软件后台运行后, 无功优化配置模块在界面上显示各节点的电压值, 以及网损最优、电压质量最优和考虑补偿点数限制的 3 种分散无功补偿方案对应的台区总网损、总补偿费用和节点电压偏移均方根值, 通过对比不同补偿方案下无功补偿的效益, 便于工作人员对比分析, 选择经济适用的补偿方案。补偿效益评估模块在界面上显示无功补偿前和集中补偿、分散补偿后台区的节点电压合格百分比、网损、补偿设备 LCC 成本、网损电费、停电损失费用、停电处理费用、停电赔偿费用以及总经济费用等指标, 便于工作人员全面评估集中和分散无功补偿方案的综合效益。

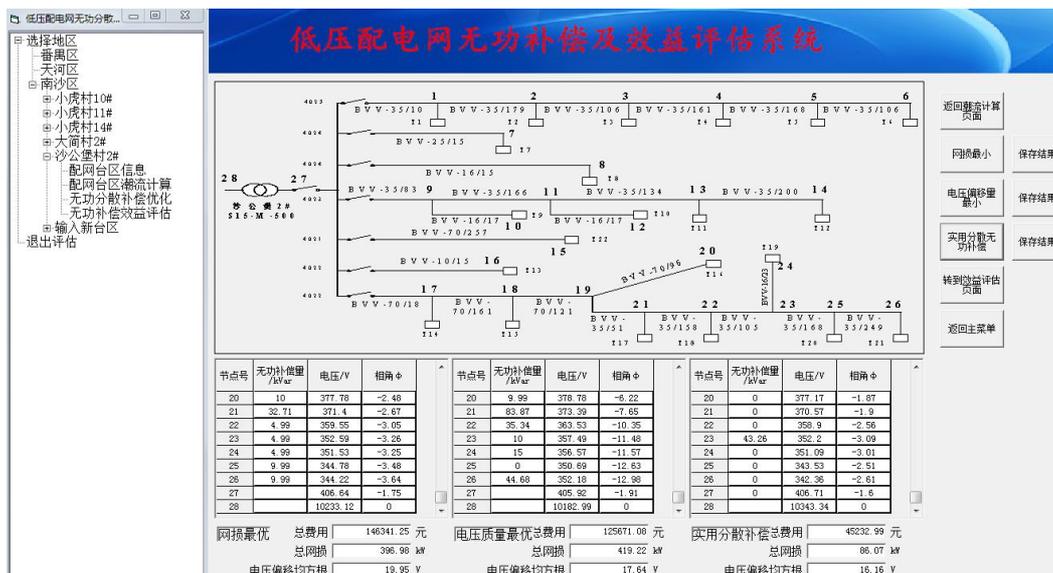


图 4 南沙区配网沙公堡台区的无功补偿分析计算

Fig. 4 Reactive power compensation calculation of Shagongbao distribution network of Nansha district



图 5 南沙区配网沙公堡台区的效益评估计算

Fig. 5 Benefit evaluation calculation of Shagongbao distribution network of Nansha district

3.2 新规划建设台区的运行实例

假设新规划建设台区有两条低压馈线，以功率作为负荷节点的计量方式，台区的配变型号为 S9-800，线路参数和负荷数据如表 1 所示。

表 1 新规划建设台区的线路参数和负荷数据

Table 1 Line parameter and load data of new program low voltage distribution network

节点号	长度/m	截面积/mm ²	负荷/kW	功率因数
1	350	75	45	0.85
2	350	80	34	0.80
3	220	75	35	0.75
4	320	80	35	0.75
5	350	80	28	0.75
6	400	75	25	0.85
7	280	80	35	0.80
8	350	85	28	0.85

台区信息输入界面的运行情况如图 6 所示，清晰直观地展示了台区的网络拓扑结构图，各支路、各节点所需输入的参数。台区无功补偿优化配置的运行界面如图 7，可以看出，无功补偿前节点 3、4 和 8 的电压值偏低，选定节点 3、4 和 8 作为安装无功补偿装置点，计算得到分别安装容量为 36 kvar、76 kvar 和 3 kvar 的无功补偿装置后，能够将节点 3、4 和 8 的电压都提高到符合规定要求的额定值的-10% 以内，即 342 V 以上。此外，工作人员还可选择其他多个无功补偿装置安装点，对比不同补偿方案的经济效益，做出合理的决策。

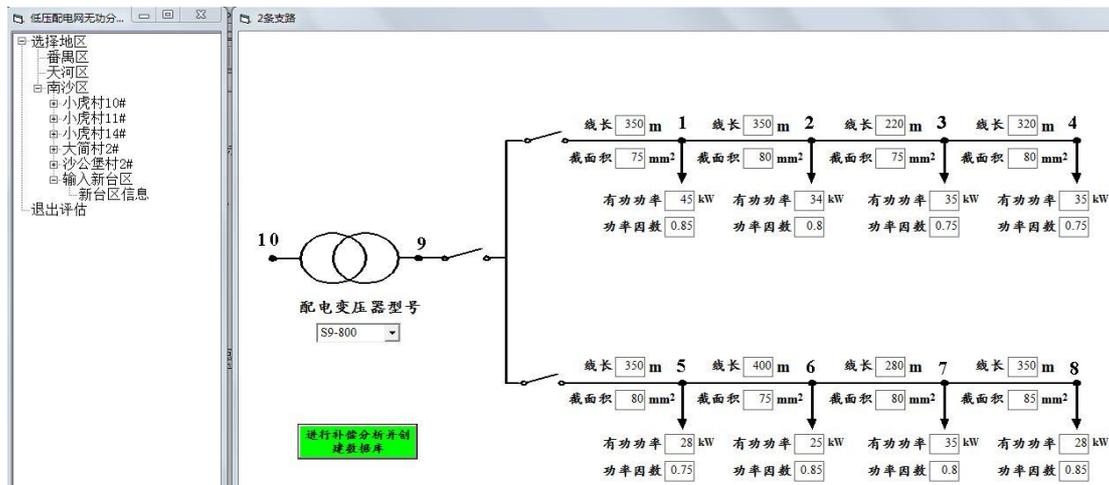


图 6 新规划建设台区的线路参数和负荷参数输入界面

Fig. 6 Input interface of line parameter and load data of new program low-voltage distribution network

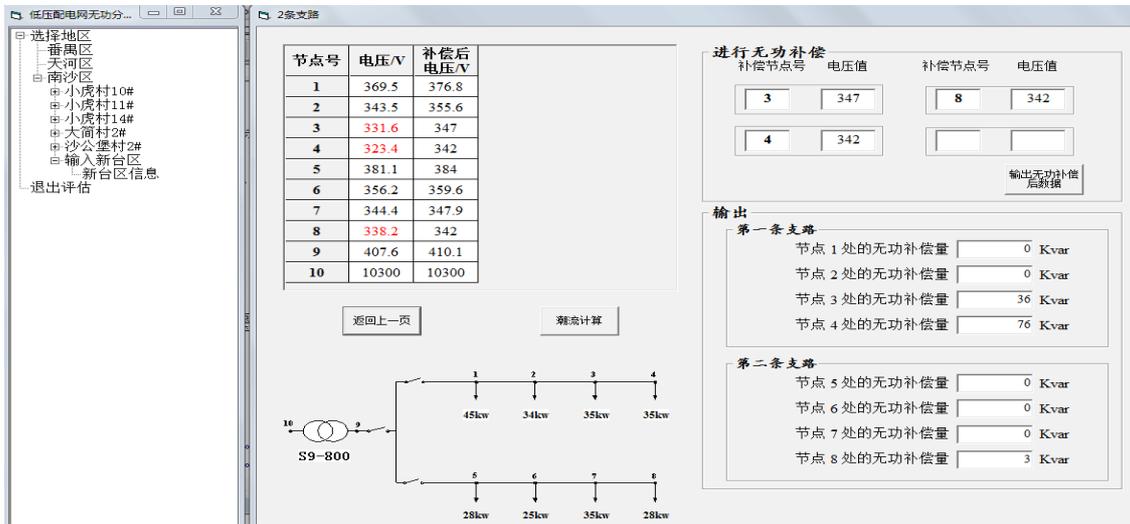


图 7 新规划建设台区的潮流计算和无功分散补偿配置优化计算

Fig. 7 Power flow and distributed reactive power compensation optimal allocation calculation of new program low-voltage distribution network

4 结论

本文开发了低压配电网无功补偿及效益评估系统,该系统能够根据实际低压配电网台区的接线、参数、电量等数据,给出该台区的无功分散补偿优化配置方案,使得各负荷节点满足电压质量要求,并评估无功补偿方案的综合效益,为电网运行人员确定低压配电网台区的无功补偿配置方案提供依据。实际运行表明,该系统具有如下特点:

(1) 提供了友好、简洁的人机界面;

(2) 能够分别给出台区在网损最小和电压质量最优目标下的分散无功补偿配置方案,并给出考虑无功补偿装置安装点数限制的实用分散无功补偿配置方案;

(3) 能够基于全生命周期成本理论评估各种无功补偿配置方案的综合效益;

(4) 既能获得已有典型台区的无功补偿分散优化配置方案,又能提供直观的图形接口由工作人员输入新规划台区信息并给出其无功补偿分散优化配置方案;

(5) 无功分散补偿优化配置方案和效益评估的结果能够根据需要进行导出和保存。

参考文献

[1] 李澍森, 杨迎建, 吴夕科, 等. 配电技术概况及发展趋势[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 113-122.
 LI Shusen, YANG Yingjian, WU Xike, et al. Overview and development trend of distribution technology[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 113-122.

[2] 张建华, 曾博, 张玉莹, 等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 13-23.
 ZHANG Jianhua, ZENG Bo, ZHANG Yuying, et al. Key issues and research prospects of active distribution network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13-23.

[3] 柳春芳, 陈剑光, 柳山. 低压无功补偿的应用与效益分析[J]. 电工技术杂志, 2002(5): 32-35.
 LIU Chunfang, CHEN Jianguang, LIU Shan. The application and discussion the benefits of LV wattles power compensation[J]. Electrotechnical Journal, 2002(5): 32-35.

[4] CHEN S X, FOO EDDY Y S, GOOI H B, et al. A centralized reactive power compensation system for LV distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 274-284.

[5] 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 Yongjun, REN Zhen, ZHONG Hongmei, et al. Cataclysmic genetic algorithms based optimal reactive power planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23): 29-32.

[6] MEKHAMER S F, SOLIMAN S A, MOUSTAFA M A, et al. Application of fuzzy logic for reactive-power compensation of radial distribution feeders[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1): 206-213.

[7] 刘健, 阎昆, 程红丽. 树状配电线路并联电容器无功优化规划[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 81-84.

- LIU Jian, YAN Kun, CHENG Hongli. Optimal planning of shunt capacitors based reactive power compensation for arborescent distribution feeders[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 81-84.
- [8] 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. DING Xiaoqun, 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.
- [9] 黄晓彤, 陈文炜, 林舜江, 等. 低压配电网无功补偿分散配置优化方法[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 44-49. HUANG Xiaotong, CHEN Wenwei, LIN Shunjiang, et al. Distributed reactive power compensation allocation optimization of low voltage distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 44-49.
- [10] 张之昊, 武建文, 李平, 等. 应用于农村配电网的测量点与补偿点分离式无功补偿设备及其优化配置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 205-213. ZHANG Zhihao, WU Jianwen, LI Ping, et al. Reactive power compensation and its optimal allocation with measurement part and compensation part separated in rural power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 205-213.
- [11] 王威, 黄大为. 含可调度分布式电源的配电网综合优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 429-433. WANG Wei, HUANG Dawei. The coordination optimization of distribution networks with dispatched distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 429-433.
- [12] 周静, 边海峰, 贾晨, 等. 基于分区的含DG配电网实时无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 117-124. ZHOU Jing, BIAN Haifeng, JIA Chen, et al. Real-time reactive power optimization in distribution network with DG based on partitions[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 117-124.
- [13] 李惠玲, 高振江, 庞占星, 等. 基于全网无功优化的配电网无功优化系统的设计[J]. 继电器, 2008, 36(10): 31-35. LI Huiling, GAO Zhenjiang, PANG Zhanxing, et al. Design of reactive power management system for distribution network based on reactive power optimization of the whole distribution network[J]. Relay, 2008, 36(10): 31-35.
- [14] 韩笑, 宋丽群, 叶森. 基于负荷统计与预测的农网配电台区无功补偿软件设计[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(4): 89-91. HAN Xiao, SONG Liqun, YE Sen. Reactive power compensation software based on load statistics and forecasts for rural distribution area[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(4): 89-91.
- [15] 郑欣, 陈文炜, 林舜江, 等. 考虑泵类负荷特性的低压配电网潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 25-31. ZHENG Xin, CHEN Wenwei, LIN Shunjiang, et al. Power flow calculation of low voltage distribution network including pump loads[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 25-31.
- [16] 朱星阳, 张建华, 刘念, 等. 适用于计及负荷电压静态特性的配网潮流新型前推回代算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 93-97. ZHU Xingyang, ZHANG Jianhua, LIU Nian, et al. A new back/forward sweep algorithm for power flow calculation in distribution network considering load static voltage characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 93-97.
- [17] 周家南, 苏宏升. 计及负荷电压静特性的含分布式电源的前推回代潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 26-32. ZHOU Jianan, SU Hongsheng. Back/forward sweep power flow calculation with distributed generation considering static load characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 26-32.
- [18] 刘胜利, 曹阳, 冯跃亮, 等. 配电网投资效益评价与决策模型研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 119-125. LIU Shengli, CAO Yang, FENG Yueliang, et al. Research and application of distribution grid investment effectiveness evaluation and decision-making model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 119-125.

收稿日期: 2015-04-27; 修回日期: 2015-12-06

作者简介:

张海鹏(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化与控制; E-mail: 1240955931@qq.com

林舜江(1980-), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统优化与控制。E-mail: linsjh@scut.edu.cn

(编辑 魏小丽)