

城网规划计算机辅助决策系统

余贻鑫, 王成山, 肖 俊, 严雪飞, 葛少云, 黄纯华
(天津大学电气自动化与能源工程学院, 天津 300072)

摘要: 系统地介绍了一个基于 GIS 的、实用的城市电网规划计算机辅助决策系统, 对系统的模型和算法进行了简要的阐述。该系统已在中国多个城市电网规划工作中获得了成功的应用, 实际应用结果表明它不仅可以优化城市电网的规划结果, 而且可以大大减轻规划人员的工作量。

关键词: 决策系统; 城市电网; 负荷预测; 优化规划; 地理信息系统

中图分类号: TM 715; TP 391.7

0 引言

城网规划工作是一项复杂的系统工程, 其复杂性突出地表现在其具有规模大、不确定和不精细因素多和涉及领域广的特点。它不仅需要大量有关城市发展的历史数据, 还需对现状网进行深入的分析, 同时, 也要对城市未来发展情况有比较全面的了解, 完全依靠规划工作者的经验规划未来的电力系统, 已经远远不能满足现代城网规划的要求。城网规划部门多年来一直期望能有一套适合中国国情的、完善的城网规划决策支持系统。本文所介绍的城网规划决策支持系统(简称 CNP2.5)正是基于这一需要而开发的。

CNP2.5 是一套基于 GIS 图形系统的电网规划软件, 系统有完善的数据库、模型库和图形库, 使用方便, 结果直观, 图形、信息齐全。鉴于城市电网规划具有很强的认知性质, 即使在软件中采用各种先进的数学模型和灵活多样的自动绘图工具, 规划工作还是离不开有经验的规划工程师的创造性的工作, 为此本模型和软件的开发中充分结合了专家的经验, 并为规划中及时吸取专家经验和供专家决策提供了良好的人机界面。在 CNP2.5 的开发过程中, 对目前城网规划的许多常规做法进行了详细地剖析, 以使系统更具实用性。目前, 该系统已在国内 20 多个大中型城市的电网规划工作中得到了应用。

1 现状网分析

现状网分析的目的在于发现现状网存在的薄弱环节, 使得电网规划工作能够有目的的进行。通过现

状网分析也可为电网的近期改造提供决策依据。这里的现状网分析包括下述功能:

a. 正常运行方式、正常负荷水平下的技术分析, 包括电网电压水平分析计算, 确定系统电压水平范围; 对系统中变压器、线路等设备的负荷率进行分析计算, 并加以评估; 对系统中各开关短路容量进行分析校核; 分析网损水平的合理性。

b. $N-1$ 运行方式、正常负荷水平下的技术分析, 包括电压水平分析和设备负荷水平评估。

c. 城网供电能力分析, 针对现状年的电网, 采用未来年度的负荷水平, 计算分析系统电压、设备负荷率等, 考核系统网架的供电能力适应性, 并进行系统 $N-1$ 分析, 评估系统的供电能力。

d. 系统可靠性分析, 利用典型的城市电网可靠性相关数据, 对系统的可靠性进行评估, 给出有关的系统可靠性指标。

e. 系统供电区域合理性分析, 包括供电范围是否有交叉、供电半径是否合理等。

2 负荷预测

包括分类电量和总电量预测、分类负荷和总负荷预测、负荷曲线预测和负荷分布预测。其中负荷分布预测又称空间负荷预测, 是城网规划工作的基础与关键。考虑到分类电量的历史数据一般比较完整, 在该子系统中采用了先电量后负荷的预测方法。电量的分类方法可以很多, CNP2.5 不受分类方法的限制, 使用者可以依据自己所拥有的原始数据的情况, 采用自己的分类方法进行预测。该子系统中所提供的电量预测方法综合了目前广泛采用的大部分预测方法。在完成分类电量预测的基础上, 通过求和可得总电量的预测值, 而分类负荷可由式(1)获得:

$$\text{分类负荷} = \frac{\text{分类电量}}{\text{分类最大负荷利用小时数}} \quad (1)$$

在分类负荷预测结果的基础上,利用分类负荷曲线(包括冬季典型的负荷曲线和夏季典型的负荷曲线)加权叠加的方法,可推知总负荷。当然总负荷也可以由总电量的预测值推得。总电量也可以利用分类电量预测方法中的模型单独进行预测。由于总电量的重要性,在系统中特别开发了一个独立模块,用多元回归法、弹性系数法等几种预测方法进行总电量的预测,以期与在分类电量预测基础上得到的总电量预测值进行对比,相互校核。

负荷分布预测的主要内容是对未来年份供电区域上负荷的需求及其分布进行预测。为此,必须将供电区域细分成若干单元小区,这样,负荷分布预测即可归结为单元小区内负荷的预测。分类分区预测法因为具有基础数据易于获得、易于适应城市规划方案的变化和灵活性强等优点,而被 CNP2.5 采用。此时,小区负荷等于所有构成负荷的代数和,因此分类负荷密度和单元小区面积构成预测是分类分区法的核心。

小区划分可采用非规则分区或规则的网格分区 2 种方法。2 种方法中小区面积都可以灵活地加以调整。

小区面积构成分析是在已知城市用地规划的前提下,利用 GIS 的相关功能通过实测来完成的。

利用分类负荷密度预测值和小区面积构成分析中得到的分类负荷面积,并计及小区内分类负荷同时系数,通过加权求和得到小区的负荷预测值^[1]。

在上述计算中,由于对一类负荷采用了统一的平均分类负荷密度预测值而引入的误差,将用一个“负荷不均衡调整系数”加以修正。这一修正对 10 kV 配网规划意义较大。

3 变(配)电所位置及容量优化规划

在城市各小区负荷值已知的基础上,利用计算机,自动地确定出目标年及中间年待建变(配)电所的地理位置及其容量,以满足未来负荷发展的需要,同时所需投资及运行费用最小。由于新建变(配)电所的地理位置、供电范围及容量都是未知的,各个变量之间相互影响、相互制约,它们的组合方案数更是大得惊人,再加之还必须综合考虑变(配)电所的进出线走廊以及地形、交通、防洪、地质等条件,所以整个问题十分复杂。在 CNP2.5 中,开发了一些有效的新算法,它们不仅可以计及小区负荷分布的不均匀性,且无需给定待选站址,通过大范围地自动寻找确定目标年变(配)电所优化位置、容量和供电范围,并快速地确定中间年的变(配)电所的优化规划方案。

依据电压等级的不同,CNP2.5 的变(配)电所

优化模型分为 2 类:①针对中压配电变压器而言,在这一电压等级的变电所容量与位置的选择中,二次(380 V/220 V)配电线的投资和运行费用的影响很大,因而在优化模型中必须较精细地加以计及,因这类变电所一般个数很多,在一个规划区内达上千座是很正常的,因此,系统中提供了一些高效、便捷的优化及人为干预方法,如规划者可以将规划区按主要街道划定的区域分区、分片进行规划等;②对于高压配电变电站的优化,二次侧线路的投资同变电所投资相比一般较小,优化模型可以适当简化,考虑到高压变电站的个数相对中压配电所而言一般数量少很多,此时可将整个规划区作为一个区域进行规划,也可按变电管理部门的管理区界分区规划。

有关变(配)电所的优化求解算法已报道于文献[2],该算法由如下 2 个子问题组成:

组合问题:试探地找出一个变(配)电所的组合(即子集合),在满足某一项或某几项条件下,使目标函数中有关投资部分最小,把它作为一种最优组合。

定点问题:对于每一个特定容量 S_j 的组合 $T = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$,寻求使目标函数最小的待建变电所的位置。对于定点问题,采用了平面多中位选址方法来解决。

在城市电网规划中,由于各个小区在不同的年代有不同的负荷数值,致使变(配)电所选址、定容量问题实际上成为一个动态优化问题。为保证计算量在工程实际允许范围之内,这里采用准动态技术来解决这一动态问题:即先用最优化技术算出满足水平年负荷情况的水平年最优变(配)电所站址和站容;然后把基础年到水平年分成若干个阶段,用水平年优化出的站址和站容作为候选站址和站容,采用特定算法排列出既满足中间各相应阶段的负荷情况又使总投资费用和年运行维护费用最小的中间各阶段建设方案。在 CNP2.5 中,采用了一种计算效率很高的基于网络流思想的新算法^[3]。

4 高压供电网网络优化规划

在 CNP2.5 中,高压供电网网络规划部分包括 3 个模型,即全期网络规划优化模型、灵敏度分析模型和分期技术经济比较模型。

全期网络规划优化模型是以待选线路为基础进行计算的。它不仅可以求得在整个规划期上最优的网络规划方案(包括分阶段方案),而且还可以提供若干个次优方案供规划设计人员选择使用。这一模型是一动态模型,但如果只取一个规划阶段,则也可以计算目标年的城网规划。

灵敏度分析模型用于对现状网(相对于规划目

标年的负荷)的过负荷支路进行灵敏度分析计算,提供一组对于消减过负荷支路最为有效的待规划路径,从而为规划设计人员提供可靠的辅助决策信息,规划设计人员可以从中选出确实可行的待规划线路。在增加新变电站以后也可以用它推荐待选线路。

分期技术经济比较模型可针对某一规划阶段或某一目标年的某一方案进行详细的技术经济比较计算,并提供基态潮流、 $N-1$ 故障分析、过负荷支路信息及经济费用等一系列数据,供规划设计人员使用。

以上 3 个模型各有不同的功能和特点,三者配合使用能够满足各种城网网络规划的需要。如果把后 2 个模型结合起来使用,就是传统的启发式网络规划方法:可以先运用灵敏度分析模型求得一组对于削减过负荷支路有效的待选线路,然后在这一组有效的待选线路中选出线路加入系统,并进行分期技术经济比较计算,如此反复进行,直至没有过负荷线路为止。这种方法适应于待选线路数目较少情况下的网络规划。

当城网待选线路较多时,则可以运用全期网络规划模型。该模型是把启发式思想和数学优化方法相结合而形成的离散时间非线性动态整数规划模型。它以各可行的路径上可增加供电线路的阻抗为控制变量,以系统中各线路的阻抗为状态变量,将规划期内各规划年上的网络扩展问题表示为一个离散时间的最优确定性控制问题。目标函数取为整个规划区内的城网网络扩展的投资费用和运行费用。使用这个模型可以求得整个规划期上最优的网络扩展方案。求解的算法以非线性分支定界法为基础,同时结合了灵敏度分析、经济性比较、可行性检验和故障排序等多种削减可行方案数目和减少计算量的方法,并在程序中采用了多种稀疏编程技术,从而使这一复杂的非线性动态整数规划问题得以在微机上求解,且其计算时间也能满足工程实际的要求。该算法除能给出一个动态最优解外,还可根据实际需要给出几个次最优方案,供规划设计人员做进一步的经济技术比较与决策之用。

5 中压配电网网络优化规划

CNP2.5 中的城市中压配电网网络优化模型是在充分研究了现有各种配电网规划方法的基础上,结合我国 10 kV 供电网络的特点,所采用的一种非线性混合整数规划模型。它是在完成负荷预测并确定了所需投建或增容的变压器的地理位置和容量的基础上,所进行的城市中压配电网网络结构的优化规划。通过对提出的待选线路进行优选,进而确定上

一级变电站二次侧 10 kV 线路出线回数、线路路径走向、导线截面以及所需投资等。

系统中所采用的非线性混合整数规划模型将城市中压配电网网络优化问题表示为一个网络流最优规划问题,目标函数取为规划水平年配电网扩展的投资费用与年损耗费用之和,以负荷需求、变压器和线路的容量限制、功率平衡和配电网的放射状条件作为约束。其中的放射状约束是通过一个启发式过程来实现的,目的是为了提提高求解速度。

系统中包含有 2 类优化方法:一种是基于最优优化算法的方法,另一种是基于规则的专家规划方法。前者包含 2 种模型:①以凹费用网络流的线性迭代为算法核心,采用网络流规划的最短路径最小费用最大流算法。同传统的分支定界法相比,线性迭代具有求解规模大、计算速度快的特点,更适用于城市中压配电网的规划。②采用一种改进的遗传算法对问题进行求解,这种方法的优点是可以获得理论上的最优解,但计算时间可能需要很长。所谓基于规则的专家规划方法是一种更为实用的规划方法。经过几十年的发展,几乎每个城市的中压配电网都已初具规模,未来配电网规划方案的实施需要大量的旧网改造工作。对于涉及城网改造的城市配电网规划,单纯地依赖数学规划算法常常不能很好的解决问题,这是由于城网改造的复杂性造成的。对几个城市配电网规划的经验表明,由配电网规划人员根据实际电网的具体情况,在规划导则的指导下,确定一些具体的规划方案,然后利用计算机提供的大量分析算法进行比较分析,是十分有效的。采用这样的方法获得的规划方案也更容易得到有关专业人员的认可。为此,在 CNP2.5 中,作为分析及辅助决策工具,提供了多个系统分析软件。同时,利用现代计算机技术,还开发了功能强大的辅助布线绘图系统。规划者利用这套工具,既可以在规划中充分融入专家经验,又可以大大提高规划工作的效率。目前,系统中主要包括下述分析软件。

a. 配电网潮流计算软件:可对二次变电站供电范围内的中压配电网进行潮流计算,提供有关网损、电压水平、线路负荷等重要信息,帮助规划者对不同的规划方案进行技术分析。

b. 配电网短路计算软件:可对二次变电站供电范围内的中压配电网进行短路电流计算,提供各个点的短路容量及短路电流,为线路中联络开关及分段开关的选择提供依据。

c. 配电网投资估算软件:可对专家提出的方案进行列表统计分析,估算出规划方案的投资费用。

d. $N-1$ 安全性分析软件:可对配电系统进行

$N-1$ 安全性分析, 这里的安全性主要包括系统电压水平、线路及设备的负荷水平。

采用基于规则的专家规划方法不仅可进行目标年的配电网规划, 而且还可完成各中间阶段年规划。在完成目标年规划后, 进行中间年规划十分容易。

6 无功电源优化规划

在无功优化规划子系统中, 应用 Bender's 分解的思想, 可以把复杂的无功优化规划问题分解为 2 个子问题, 即运行子问题和投资子问题^[4]。根据各自的特点选用相应的方法分别求解, 并与实际系统中的一些经验规则相结合, 既降低了求解的复杂程度, 又能提高算法的灵活性。同时, 系统中还提供了考虑多负荷水平及进行多阶段无功优化规划的方法, 更增加了系统的实用性。

7 配电系统可靠性分析

目的是通过计算诸如系统平均停运时间 (SAIDI)、系统平均停运次数 (SAIFI) 等可靠性指标, 完成对规划网络的评估。

8 结语

城市电网规划工作本身是一件十分复杂的工作。无论计算机软件开发得如何完善, 模型和算法如何先进, 一个好的规划结果离开规划人员的参与也是不可能的。本文所介绍的系统实际上是城网规划工作者的一种辅助决策工具。这一系统的应用, 可以将规划工作者头脑中许多定性的指标加以量化, 有助于规划结果的科学性和先进性。同时, 这一系统可以帮助规划工作者大大提高城网规划工作效率, 使

得规划工作者得以从繁重的工作中解脱出来。另一方面, 该系统的应用有助于规划工作者对规划相关的数据的积累, 便于不断地对电网实施滚动规划。

参考文献

- 1 王成山, 黄纯华, 葛少云, 等 (Wang Chengshan, Huang Chunhua, Ge Shaoyun, et al). 一个实用的城市电力负荷密度预测系统 (A Practical Forecasting System for Urban Electric Load Density). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1992, 16(6): 41~46
- 2 Dai Hongwei, Yu Yixin, Huang Chunhua, et al. Optimal Planning of Distribution Substation Locations and Sizes——Model and Algorithm. International Journal of Electrical Power and Energy System, 1996, 18(6): 353~357
- 3 Duan Gang. Global Optimization and Transmission-Distribution System Planning and Reconfiguration; [Ph D Desertation]. Tianjin: Tianjin University, 1999
- 4 王成山, 唐晓莉, 余贻鑫 (Wang Chengshan, Tang Xiaoli, Yu Yixin). 基于启发式算法和 Bender's 分解的无功优化规划 (Optimal Reactive Power Planning Using Heuristic Method and Bender's Decomposition Technique). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1998, 22(11): 14~17

余贻鑫, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统安全性与稳定性分析以及配电网规划等方面的研究和教学工作。

王成山, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统安全性分析、城市电网规划和配电系统自动化等方面的研究和教学工作。

COMPUTER DECISION-MAKING SUPPORT SYSTEM FOR URBAN POWER DISTRIBUTION NETWORK PLANNING

Yu Yixin, Wang Chengshan, Xiao Jun, Yan Xuefei, Ge Shaoyun, Huang Chunhua
(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A practical GIS based computer decision-making support system with eight subsystems for urban power distribution network planning is introduced. The models and methods of the system are described. In each subsystem there at least one practical mathematical method is available. Some new models and mathematical methods are introduced. This system has been successfully applied in some real urban power networks. The results show that it can not only optimize the planning results of urban power distribution network considering many complicated factors, but also reduce the work of computation, analysis and graphic drawing.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 59877017) and National Medium and Small Business Innovation Foundation of China.

Keywords: decision-making support system; urban power distribution network; load forecasting; optimal planning; GIS