

计及通道因素的城市中压配电网规划

朱涛, 肖峻, 王成山

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 深入分析了城市配电网电缆通道的特点, 在此基础上, 提出一种新的配电网规划模型, 将通道的投资费用和维护运行费用纳入目标函数, 设计并完善了 GIS 空间数据库结构, 采用最短路径法产生初始规划网架, 并采用适于复杂系统全局优化搜索的遗传算法进行优化, 最终形成候选规划方案。实际算例分析表明, 在网络规划中考虑通道成本, 使得网络规划结果更具实用性和经济性, 对实际的配电网规划也更具指导意义。

关键词: 配电网规划; 电缆通道; 地理信息系统; 遗传算法

Planning of urban mid-voltage distribution network considering cable trench

ZHU Tao, XIAO Jun, WANG Cheng-shan

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on analyzing the specialties of urban distribution cable trench, this paper presents a new model of distribution network planning, which considers the investment and operation costs of cable trench into objective function. After designing and improving GIS spatial database structure, this paper adopts Shortest Path Method to produce preliminary network, and then uses Genetic Algorithm to optimize the preliminary network. The candidate plans are formed ultimately. The analysis of practical case shows that the network planning considering the cost of cable trench guarantees the practicality and economy of results, and it also has certain guidance for practical network planning.

Key words: distribution network planning; cable trench; geography information system; genetic algorithm

中图分类号: TM715

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)13-0033-06

0 引言

近年来, 随着城市化进程的加快, 配电网的建设越来越得到重视, 尤其是对繁杂的中压配电网, 各地都加大了投资力度。配电网由规模庞大的电力设备和装置组成, 对其网络结构的改进可能意味着大量投资的节省。做好城市中压配电网规划, 在节约投资和运行费用的同时, 又能满足用户对供电可靠性的要求, 显得至关重要。

城市中压配电网规划是一个具有多目标性、多阶段性、不确定性和非线性等特点的复杂系统优化问题, 国内外很多学者对此作了相关研究, 如文献[1~3]均结合地理信息系统(GIS), 采用启发式搜索方法中适合于全局优化搜索的遗传算法(GA)进行问题求解。其中, 在配电网规划模型建立上, 文献[1]考虑了线路的投资和网络损失费用; 文献[2]在目标函数中不仅考虑了线路的投资、维护和运行费用, 还包括了用户停电损失; 文献[3]不仅考虑了线路的投资运行费用, 还将配电站和开关的投资运行费用也纳入了经济性指标, 使得规划结果更完整。

然而, 这些成果都没有考虑电缆通道对网络规划结果的影响。不考虑电缆通道影响的配电网规划结果常常会与实际的电缆通道规划不相适应, 不得不依赖工程人员对电网规划的线路走径方案进行人工修正, 工作量大, 同时降低了规划方案的科学性。

本文在分析电缆通道特点的基础上, 提出了一种计及通道因素的城市中压配电网规划模型, 并利用文献[3]所述的 GIS 空间数据库和智能布线搜索算法实现了问题的求解。

1 电缆通道概述

随着城市建设的发展, 人们对居住环境有了更高的要求。在城市建设和改造规划中, 对新建片区、繁华地带往往要求所有管线在地下敷设, 作为“城市生命线”之一的电缆更是如此。

地下电缆的敷设方式主要有直埋、电缆沟、排管、顶管、电缆隧道等^[4], 它们在适用环境和技术上都有较大差别, 具体比较如表1所示。电缆敷设方式的选择需结合具体的电缆线路路径环境, 根据统一规划、安全运行和经济合理等原则确定敷设方

式和相应的附属土建设施规模。在本文中, 结合中压配电网规划的实际情况, 对于沿街道敷设的主干线路采用排管方式作为电缆通道。考虑到实际工程

中一般敷设走径与道路中线或建筑红线平行, 本文排管敷设路径按道路中线确定。

表 1 电缆敷设方式技术比较

Tab.1 Technical comparison of cable laying means

敷设方式	周边环境	优势	劣势
直埋	适用于电缆线路不太密集的城市地下走廊, 如市区人行道、公共绿地、建筑物边缘地带等。	不需要大量的土建工程, 施工周期较短。	检修、维护需开挖道路, 不方便。
电缆沟	适用于地面载重负荷较轻的电缆线路路径, 如工厂厂区、发电厂和变电站内。	易于故障处理和维修, 发生外力破坏少。	空气散热条件差, 允许载流量低。
排管	适用于城市交通比较繁忙, 有机动车等重载, 敷设电缆条数比较多的地段。	施工相对简单, 线路相互影响小, 且检修维护方便。	土建工程投资较大, 工期较长, 修理费用较大。
顶管	适用于不宜开挖, 且路径短的路段, 一般配合其它敷设方式使用。	介于排管和隧道之间	介于排管和隧道之间。
电缆隧道	适用于电缆穿越河道、变电站出线及重要道路电缆条数多的地段。	散热好, 无外力破坏, 易于故障处理; 可敷设多条电缆。	施工复杂, 工期长, 维护量大(排水、通风、照明等)。

2 配电网 GIS 数据库构建

GIS 空间数据库是对空间数据合理存放的集合, 在此基础上开发的空间数据库管理系统能够有效地提供空间查询和分析, 为配电网的规划工作提供有力的辅助手段。

表 2 街道段的空间数据结构表

Tab.2 Spatial data structure of street segment

字段名称	数据类型	说明
街道标识号	整型	对应的街道标识号
街道段标志号	整型	每条街道段的标识号
拓扑类型	字符型	拓扑结构: 线状
起点编号	整型	街道段起点标识号
起点坐标	浮点型	街道段的起点坐标
终点编号	整型	街道段终点标识号
终点坐标	浮点型	街道段的终点坐标
街道段长度	浮点型	街道段的长度
最大线路条数	整型	允许的最大线路铺设条数
地价系数	浮点型	街道段所在的地价系数

表 3 通道段的空间数据结构表

Tab.3 Spatial data structure of trench segment

字段名称	数据类型	说明
通道段标识号	整型	该通道段的标识号
拓扑类型	字符型	拓扑结构: 线状
起点编号	整型	通道段起点标识号
起点坐标	浮点型	通道段的起点坐标
终点编号	整型	通道段终点标识号
终点坐标	浮点型	通道段的终点坐标
通道段长度	浮点型	通道段的长度
敷设方式	字符型	通道段的敷设方式
通道孔数	整型	通道段容纳的孔数
电缆条数	整型	通道段实际敷设电缆数

配电网规划地理图中的各类信息是以不同的层存储的, 为了使数据库的存储和以后查询操作方

便, 对于不同的层应以不同的数据表来存储, 如街道、负荷、配电站、线路、通道等。其中, 对于配电站和负荷的空间数据结构, 其拓扑类型为点状地理实体; 对于街道段、线路、通道等的空间数据结构, 其拓扑类型为线状地理实体。本文采用了文献[3]的 GIS 空间数据库, 并进行了原有数据结构的完善, 添加了电缆通道相关的数据信息。表 2 和表 3 分别为街道段和通道段的空间数据结构。限于篇幅, 其它的空间数据结构不在此一一列出。

在对所有配电网空间数据建立模型后, 采用 SQL Server 数据库设计了配电网的空间数据库管理系统, 即按照每个空间地理实体都对应数据库中一个相应空间数据表的原理, 采用关系数据库模式和 SQL Server 中相应的技术来管理这些空间数据表, 然后结合图形系统形成了较完善的配电网 GIS。

3 计及通道的配电网规划模型及求解

本文假定在网络规划之前已经完成了规划区的负荷预测和高压变电站的选址定容工作, 规划目的是确定出若干年后的目标网络结构, 包括线路走径和开关设备设置, 同时建立一个与目标网架相适应的电缆通道系统, 使规划网络在保证安全可靠的前提下做到经济上的优化。

3.1 目标函数

设 F 为城市中压配电网规划的总目标函数, F_{NS} 为 110 kV 或 35 kV 的变电站的年费用, F_{NL} 为 10 kV 线路的年费用, F_{NK} 为开关设备的年费用, F_{NP} 为与网络相适应的电缆通道系统的年费用, G 为包括可靠性指标在内的配电网规划约束条件, 则考虑通道因素的配电网规划数学模型为:

$$\begin{cases} \text{Min } F = F_{\text{NS}} + F_{\text{NL}} + F_{\text{NK}} + F_{\text{NP}} \\ \text{s.t. } G \end{cases} \quad (1)$$

1) 变电站的年费用 F_{NS}

对于变电站的综合投资费用,实际上作为规划结果已经可以获得,但考虑到规划工程的系统性和完整性,仍然将其纳入了目标函数。

考虑建设的时间因素,应用动态经济原理的“现值转年值”法^[5],将发生在建设期内不同时间点的全部费用通过资金等值计算折算成同一时间点后直接进行计算。变电站的综合投资费用折算成年费用,具体表示为

$$F_{\text{NS}} = Z_{\text{S}} \left[\frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} \right] + \alpha \Delta A_{\text{S}} \times 10^{-4} + U_{\text{S}} \quad (2)$$

其中: Z_{S} 为变电站的综合投资,包括变电综合投资、变电装置投资以及附加投资等; r_0 为电力工业投资回收期, n 为设备的经济使用年限; α 为当年的电能电价; ΔA_{S} 为变压器全年电能损失量; U_{S} 为变电站检修维护费用,一般可按照投资百分率计算。

2) 10 kV 中压线路年费用 F_{NL}

将中压线路的投资运行费用折算成年费用,包括年投资费用、年检修维护费用和全年电能损耗费用,即

$$F_{\text{NL}} = k' C_0 \sum_{i=1}^N L_i \left[\frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} \right] + \alpha \Delta A_{\text{L}} \times 10^{-4} + U_{\text{L}} \quad (3)$$

其中: k' 为线路曲折系数,即用理想线路长度估算实际长度的比例系数; C_0 为单位长度线路投资(万元/km); L_i 为每回主干线路长度(km); ΔA_{L} 为线路全年电能损失总值(kWh); U_{L} 为线路的检修维护费用,一般也可按照投资百分率进行计算。对于线路的全年电能损失总值 ΔA_{L} , 它为线路最大负荷损耗小时数与线路总有功损耗的乘积。

3) 开关设备的年费用 F_{NK}

为了提高配电网辐射线路的供电可靠性,考虑在线路确定以后,按照“成本—收益分析法”和每段负荷均匀的原则进行最优分段处理^[6]。

开关设备的年费用可表示为

$$F_{\text{NK}} = Z_{\text{K}} \left[\frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} \right] + U_{\text{K}} \quad (4)$$

其中: Z_{K} 为开关设备的初投资费用; U_{K} 为开关的年检维护费用,可按投资百分率进行计算。

4) 电缆通道的年费用 F_{NP}

电缆通道的年费用计算公式如下:

$$F_{\text{NP}} = \sum_{i=1}^N (C_{\text{pi}} L_i + \lambda_{1i} \lambda_{2i} C_{\text{li}} S_i \times 10^{-4}) \left[\frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} \right] + U_{\text{P}} \quad (5)$$

其中: i 为满足线路走向而敷设的各个通道段; C_{pi} 为电缆通道段 i 的单位长度费用(万元/km), L_i 为该通道段 i 的长度(km); C_{li} 为在街道段上敷设电缆通道段 i 的单位面积挖掘修复费用(元/m²), S_i 为该街道段的挖掘修复面积(m²), λ_{1i} 为该街道段的地价系数, λ_{2i} 为该街道段的道路等级系数; U_{P} 为通道的年运行费用,主要是指检修维护费用。

3.2 约束条件

结合城市中压配电网的实际特点,需要考虑如下的约束条件。

1) 可靠性约束

为了反映系统停运的严重程度和重要性,一般用平均用电有效度来评估:

$$\begin{aligned} R_{\text{ASAI}} &= \text{用户用电小时数} / \text{用户需电小时数} \\ &= \frac{N_{\text{总}} \times 8760 - \sum U_j N_j}{N_{\text{总}} \times 8760} \end{aligned} \quad (6)$$

其中: $N_{\text{总}}$ 为系统中总用户数; U_j 为平均年停运时间; N_j 为故障时受影响的用户数,与 U_j 相对应; 8760 为每年的小时数。

2) 容量约束

对于配电站的出线,需满足容量约束:

$$P_l \leq P_l^{\text{max}}, \quad l = 1, \dots, N_l \quad (7)$$

式中: P_l 与 P_l^{max} 分别为线路 l 所带的负荷值总和与最大允许传输有功功率; N_l 为配电站出线的总根数。

3) 电压降约束

由于本文进行的是主干线路的网络规划,并未涉及分支线路具体带负荷的情况,因而只考虑一级分支线路。

$$V_k^{\text{min}} \leq V_k \leq V_k^{\text{max}}, \quad k = 1, \dots, N_n \quad (8)$$

式中: V_k^{min} 、 V_k^{max} 和 V_k 分别为主干线路上一级分支线路出线点的电压上、下界和正常运行电压; N_n 为主干线路上所有一级分支线路出线点的数量。

4) 地理信息约束

在城市配电网的规划中,无论是架空线路还是地下电缆线路,主干线路还是分支线路,都必须考虑实际城市道路的布局要求。

3.3 求解策略

本文考虑配电网规划的实际特点,采用文献[3]中的求解策略进行本规划模型的求解,即采用最

短路径法随机方式生成配电网络的初始网架，然后采用遗传算法来优化网架，具体搜索流程如图 1 所示。

在适应度计算过程中，对于给定规格的通道段，当敷设的电缆条数在其孔数容纳范围内时，增加电缆条数并不会带来通道成本的变化，而一旦突破现有通道段的容纳范围时，则需要通过改变通道段规格来适应新的变化，同时带来了通道成本的突变。因此，针对电缆通道的敷设成本跳跃性特点，必须对线路和通道费用进行解耦处理。

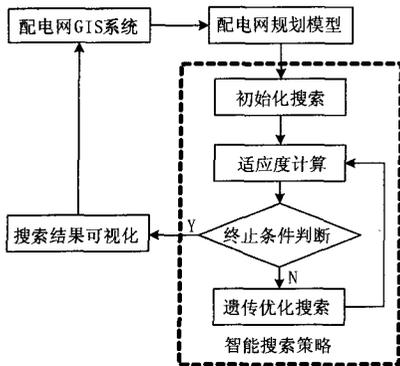


图 1 采用 GA 进行配电网规划搜索的流程
Fig.1 Flowchart for planning search of distribution network using GA

本文对于线路和通道的费用进行分阶段计算，具体流程如图 2 所示，即首先得到不考虑通道因素的线路规划方案，然后得到该线路敷设方案对应的通道方案，两者的费用成本分别计算后共同纳入初始代和优化代的规划成本。

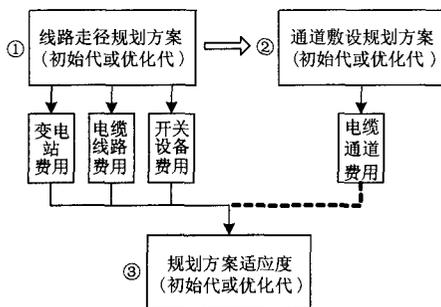


图 2 分阶段进行适应度计算的流程图
Fig.2 Flow chart for fitness calculation in process

4 算例

以某 110 kV 的高压配电站的辐射线路规划为例，根据本文提出的网络规划模型，利用遗传搜索算法进行网络线路规划。如前文所述，规划区域的负荷预测和变电站选址定容已经完成。图 3 给出了

该 110 kV 高压配电站 (2×40 MVA) 的供电范围、各小区负荷预测值，以及规划区域的街道地理走向。

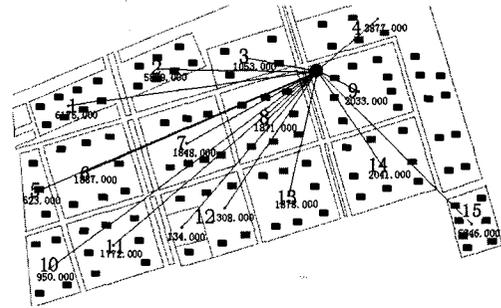


图 3 某 110kV 高压配电站网络规划背景图
Fig.3 The background map of some 110kV substation for network planning

4.1 原始参数

计算中，主干线路的导线型号采用 YJV-3×300 mm² 电缆线路，电缆通道全部采用排管进行敷设。算例中所用设备的经济技术数据和可靠性数据分别如表 4、表 5 所示。

表 4 算例所用设备的经济技术数据

Tab.4 The economic and technical data of equipments

设备及其型号	投资费用 /万元	使用年限/年	检修维护率/(%)	
2×40 MVA 变电站	2700	25	4.2	
YJV-300 mm ² 电缆线路	40/公里	40	2.6	
开关	3/台	25	2.0	
电力电缆排管	5 孔	100/公里	30	2.0
	8 孔	120/公里		
	10 孔	190/公里		
	24 孔	250/公里		

表 5 算例所用设备的可靠性数据

Tab.5 The reliability data of equipments

设备	设备故障率	平均修复时间 (小时/次)
配电变压器	0.00043 (次/台×年)	20
断路器	0.02 (次/台×年)	15
母线	0.03 (次/条×年)	2
隔离开关	0.05 (次/台×年)	8
电缆线路	0.00791 (次/km×年)	9

4.2 计算结果

采用本文求解策略进行计算，可以得到该高压配电站的网络规划候选方案。表 6 所示为该高压配电站出线布局的初始网架和各代群体中最优网架的各项数据信息。本算例在第 17 代达到最优结果，由于篇幅的限制，我们在这里仅给出初始代、第 1 代、第 2 代、满足最优条件后的 17 代的结果数据。

表 7 所示为该高压配电站辐射出线布局的最优网架对应的通道系统敷设信息表，给出了通道敷设

的具体路径信息和通道段的排管规格。

表 6 某 110 kV 高压配电站辐射出线的初始代和优化代最优网架的数据信息表

Tab.6 Information of optimum network in the initial and optimal generations of some 110 kV substation radial route

代数	年投资和运行 总费用(万元/年)	可靠性指标 (ASAI)	配电站年费用 /万元	线路年费用/ 万元	开关年费用 /万元	通道年费用/ 万元	出线 根数	线路总长度 /km
初始代	630.5263	0.9998525	474.84938	73.638446	7.1664266	74.872093	14	15.15405
第 1 代	603.2020	0.9998541	474.84938	64.098338	3.1532277	61.101096	8	9.59654
第 2 代	600.4055	0.9998548	474.84938	62.784509	3.1532277	59.618335	7	8.60323
...
第 17 代	585.4704	0.9998568	474.84938	51.03674	2.5799136	57.004373	6	6.73805

表 7 某 110 kV 高压配电站辐射出线布局的最优网架对应的通道系统敷设信息表

Tab.7 Information of cable trench laying system corresponds with optimum network of some 110 kV substation radial route

通道段 ID	途径街道段 ID	敷设的电缆条数	需要的电缆排管孔数	通道段排管规格
1	103	5	8	8
2	104	2	3	5
3	701	1	2	5
4	702	1	2	5
5	804	2	3	5
...
27	3910	1	2	5

注：通常在通道建设上需考虑今后加排管的可能性，本算例中采用 50% 的冗余度。

表 8 考虑通道因素与不考虑通道因素的计算结果对比

Tab.8 Comparative results with/without cable trench

项目	年投资和运行 总费用(万元/年)	配电站年费用 /万元	线路年费用/ 万元	开关年费用 /万元	通道年费用/ 万元	出线 根数	线路总长度 /km
本文模型	585.4704	474.84938	51.03674	2.5799136	57.004373	6	6.73805
文献[3]模型	597.3997	474.84938	54.991742	3.1532277	64.405371	7	7.26020

4.3 可视化输出

通过上述计算，得到了该高压配电站的网络规划数据信息，进一步将线路走径在规划背景图上进行自动布线，实现规划结果的可视化输出，图 4 为该高压配电站网络规划最终代布线图。

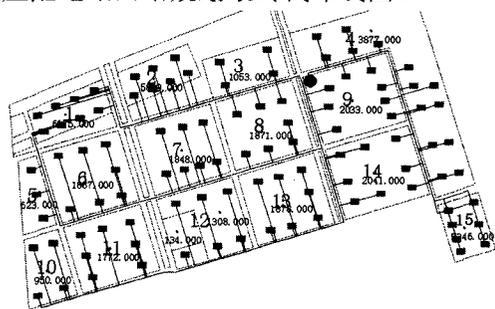


图 4 某 110 kV 高压配电站网络最优规划图

Fig.4 Optimum network planning map of some 110kV substation

从图中可看到，该配电站的线路走径皆是沿着

街道的地理中心线布设，符合工程实际要求。同时，将规划结果在规划背景图上进行输出，方便规划人员根据环境特点进行人工修正。

4.4 结果对比分析

不考虑通道因素的影响，同样采用文献[3]的模型求解策略对本算例的高压配电站进行网络自动布线，可以得到网络规划的线路最优方案，再计算与之相适应的通道敷设方案，从而能够获得整体规划工程的经济性数据。

将本文计算结果与不考虑通道因素的规划方案进行对比分析，如表 8 所示。数据表明，计及通道因素的城市中压配电网规划能够使通道年费用节省 11.49%，线路年费用节省 7.19%，从而使得配网规划工程的整体经济性更好。

5 结论

本文从规划工程的角度出发，在传统城市配电

网的基础之上,建立了较为完备的规划模型,其中计及了规划工程中的通道因素影响。对于规划模型的求解,考虑到各种优化方法的优缺点和配电网及通道自身的实际特点,本文使用最短路径算法得到初始方案,并用遗传算法进行优化,得到了令人满意的效果。通过算例分析,本文采用 GIS 空间数据库开发的思路,将整个配电网和地理环境能够有效地结合起来,实用化更强,对配网电缆通道建设也有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 谢敏,敬东.遗传算法在配电网规划中的应用[J].电站系统工程,2002,18(1):30-32.
XIE Min, JING Dong. Genetic Algorithms Applied in Planning of Distribution Network[J]. Power System Engineering, 2002, 18(1): 30-32.
- [2] 王春生,赵凯,彭建春.基于地理信息系统和遗传算法的配电网优化规划[J].电力系统自动化,2000,24(14):48-51.
WANG Chun-sheng, ZHAO Kai, PENG Jian-chun. GIS Based Optimal Planning for Distribution System Using GA[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(14): 48-51.
- [3] 王成山,王赛一.基于空间 GIS 的城市中压配电网智能规划(一):辐射接线模式的自动布局[J].电力系统自动化,2004,28(5):45-50.
WANG Cheng-shan, WANG Sai-yi. The Intelligent Planning of Urban Mid-voltage Distribution Network Based on Spatial GIS: Part One Automatic Routing of Radial Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 45-50.
- [4] 史传卿.电力电缆讲座—第二讲 电缆线路设计与敷设施工[J].供用电,2001,18(4):53-56.
SHI Chuan-qing. Lecture on Power Cable: Part II Design and Laying of Cable Lines[J]. Distribution and Utilization, 2001, 18(4): 53-56.
- [5] 王成山,王赛一,葛少云等.中压配电网不同接线模式经济性和可靠性分析[J].电力系统自动化,2002,26(24):34-39.
WANG Cheng-shan, WANG Sai-yi, GE Shao-yun, etc. Economy and Reliability Analysis of Different Connection Modes in MV Distribution Networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 34-39.
- [6] 康庆平,卢锦玲,杨国旺.确定城市 10 kV 配电网线路最优分段数的一种方法[J].电力系统自动化,2000,24(13):57-59.
KANG Qing-ping, LU Jin-ling, YANG Guo-wang. A Method for Optimizing the Number of Sections of Feeder on 10kV Distribution Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(13): 57-59.
- 收稿日期:2006-12-28 修回日期:2007-03-09
作者简介:
朱涛(1981-),男,硕士研究生,主要从事城市配电网的评估、规划等方面的研究工作;E-mail: zhutao_tju@yahoo.com.cn
肖峻(1971-),男,博士,副教授,硕士生导师,从事城市电网规划、评估和配电自动化方面的研究与应用工作;
王成山(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统安全性分析、电网规划和配电系统自动化等方面的研究工作。
- (上接第 32 页 continued from page 32)
- CHEN Gen-jun, WANG Lei. An Ant Colony Potimization Method for Transmission Network Expansion Planning[J]. Power System Technology, 2001, 25(6): 21-24.
- [4] 黄良宝,单渊达.电力系统规划Hopfield优化模型的模拟退火算法[J].东南大学学报,1996,(2):31-37.
HUANG Liang-bao, SHAN Yuan-da. Incorporating Simulated Annealing Algorithm into Hopfield Models for Power System Expansion Planning[J]. Journal of Southeast China University, 1996 (02): 31-37.
- [5] 康庆平,庄丽晖.一个实用的启发式电网优化规划方[J].电网技术,1993,17(3):51-55.
KANG Qing-ping, ZHUANG Li-hui. Optimum Planning of Transmission Network: a Practical Heuristic Method[J]. Power System Technology, 1993, 17(3): 51-55.
- [6] 孙洪波.电力网络规划[M].重庆:重庆大学出版社,1996.
SUN Hong-bo. Power System Planning[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1996.
- [7] 程浩忠.电力网络规划的方法和应用[M].上海:上海科学技术出版社,2002.
CHENG Hao-zhong. The Method and Application of Power Network Planning[J]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2002.
- [8] 清华大学,浙江大学.电力系统计算[M].北京:水利电力出版社,1978.
Tsinghua University and Zhejiang University. Power System Calculation[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1978.
- 收稿日期:2007-01-07; 修回日期:2007-03-11
作者简介:
秦茹静(1981-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统规划;E-mail: vivian_qinruijing@163.com
王淳(1962-),男,博士,副教授,从事电力系统规划;
苏慧玲(1983-),女,硕士研究生,研究方向为发电系统可靠性。