

103280

242-53  
1703

**全 国 高 等 学 校**  
**电 力 系 统 及 其 自 动 化 专 业**  
**第 三 届 学 术 年 会 论 文 集**

西 安 交 通 大 学 出 版 社

## 前 言

全国高等学校电力系统及其自动化专业第三届学术年会于1987年10月26日至30日在浙江大学召开，出席年会的有来自全国32所高等院校的代表共136人。水利电力部及其下属部分单位的代表也出席了会议。

本届年会的主要内容仍然是学术交流。年会共收到论文130篇，其中97篇论文分四组进行了宣读讨论，其余33篇在会议期间，发给代表进行交流。

本届年会论文数量多，质量高，反映了高等学校在电力系统及其自动化专业方面所取得的研究成果。会议学术空气活跃，讨论热烈。

在会议期间，代表们还就有关教学改革和科研工作的经验和成果进行了广泛而深入的讨论，各抒己见，畅所欲言，气氛融洽。通过交流和讨论，大家感到收获很大，对各校今后的教学和科研工作将起到良好的促进作用。

经年会研究，决定出版第三届学术年会论文选集。限于人力和财力，在宣读过的论文中评选出32篇论文刊登全文，其余65篇刊登摘要。由于部分作者未能按期寄出稿件或其它原因，而使部分摘要未能收入本论文集。

由于时间仓促，且限于水平，对论文集集中不妥之处，敬请读者指正。

全国高等学校电力系统及其  
自动化专业第三届学术年会

1988年3月

# 目 录

## 电力系统规划设计及稳态运行分析

1. 输电网中长期规划——支路追加法  
.....王仲鸿 韩英铎 祁达才 童陆园( 1 )
2. 城市电网规划中变电站容量的动态优化  
.....杨期余 张仲力 杨明志 李平之( 7 )
3. 城市民用能源优质化方向探讨——电气化优于煤制气化.....林家豪( 12 )
4. 电力系统多目标无功功率优化  
.....岑文辉 马铁松 王祖佑 颜明娣 周 浩( 18 )
5. 树枝状地区网络中固定和开关电容器的综合优化配置.....程光弼 严庆伟( 23 )
6. 实用电力系统静态安全分析.....王锡凡 王秀丽( 28 )
7. 江苏电力系统静态安全分析.....单渊达 李 宏 马海立 高晓萍( 33 )
8. 基于网络法的电力系统有功经济调度新算法.....张启平 骆济寿( 37 )
9. 交-直流电力系统潮流的快速解耦算法.....吴国炎( 41 )
10. 直流输电系统中换流变压器三相参数不等情况下的  
非特征谐波计算.....廖 庆 夏道止( 47 )
11. 制约寻优法最优潮流中制约区与回引区的制约引导作用.....陈小虎 柳 焯( 54 )

## 电力系统暂态过程和稳定性分析及控制

12. 计及紧急控制作用的电力系统直接暂态稳定分析.....刘 笙 董传友 于奇志( 60 )
13. 装有静止无功补偿装置的复杂电力系统静态稳定性分析  
.....刘遵义 夏道止( 66 )
14. 电力系统集结二阶法及外部系统分割降阶法.....黄 眉 刘 取 张庆民( 70 )
15. 暂态稳定计算中的网络方程.....陈亚民( 76 )
16. 电力负荷的动静综合模型.....鞠 平 马大强( 82 )
17. 电力系统中并联电容补偿装置对系统  
短路电流的助增作用.....张道泉 颜婉仪 栾建川  
浙江电力系统试验站并联补偿研究组 ( 87 )
18. 三相变压器励磁涌流的计算.....盛海华 李 菊( 93 )
19. 交直流并联系统交流母线电压稳定性评估的模型和算法.....冉 立 任 震( 100 )
20. 大规模电力系统暂态稳定解耦控制.....王 余 王仲鸿( 105 )
21. 多机电力系统分散最优励磁控制器研究.....陈淮金 韩英铎( 110 )
22. 多机电力系统非线性励磁控制的研究.....卢 强 孙元章( 116 )
23. 发电机励磁系统自校正控制.....胡国根 许克明 周 原( 121 )

## 电力系统继电保护及自动装置

24. 高压电网方向、相差高频保护的计算机整定.....王静茹(128)
25. 发电机的微机差动和接地保护.....陆于平 史世文(134)
26. 计算机继电保护中卡尔曼滤波的研究.....郝维镛 许华乔(140)
27. 电力系统频率偏移情况下傅里叶算法的时变特性及高次  
谐波对算法的影响.....杨念慈 姜惠兰 徐明(146)
28. 静态继电保护装置可靠性的研究.....李永丽 贺家李(153)
29. 新型原理的“+90°”接线有功功率变换器  
.....姚晴林 汪家侃 刘献平(157)
30. 电力系统失步快速预测装置三个基本要素.....张保会 葛耀中(161)
31. 用于电量统计自动化的便携式数据采集系统.....胡继武 孙杨声(167)
32. 编写火电厂电气设备操作票的专家系统.....龙明 张文勤(171)

## 论文摘要(43篇)

# 输电网中长期规划——支路追加法

王仲鸿 / 韩英铎 / 祁达才 / 童陆园

(清华大学电机系)

## 0 引言

电力系统规划是由电源规划、输电网规划和配电网规划三部分组成。按时间顺序和实际要求,输电网可分成短期规划、中长期规划和远景规划。输电网中长期规划是研究未来5—20年电网扩建的投资策略和网架构想。其任务是:规划何时、何地、架设多少条何种电压等级的待选线来经济、可靠地消除系统在各阶段出现的原有线路潮流过载现象。这是一个动态过程,要完全准确求解还比较困难。然而,随着电力系统的发展,输电网中长期规划方案的投资是相当大的。而且,由其形成的网架合理性又在较长时期内影响着整个电力系统电力供应的特性。另一方面,就我国规划、设计部门而言,目前还没有一套优化的、令人信服的中长期规划方法。显然这已不能适应系统规划发展的要求。因此,探讨输电网中长期规划的理论并使其在实际中得到应用这一课题变得越来越迫切。

60年代初, Kight<sup>[1]</sup>首先将数学优化技术和计算机应用到输电网规划中。经过20余年的努力,目前提出解决输电网中长期规划问题的方法不胜枚举。由于问题的复杂性,一般将其分成静态决策和动态决策两个子问题。静态决策是规划单阶段的架线消除过载问题,动态决策则考虑架线过程的阶段性。

本文只涉及输电网中长期规划的静态决策问题。

给定未来某一阶段系统的电源出力和负荷分布后,欲求出最优的架线方案,这从数学上来说是一个离散、非线性、组合优化问题。一般来说,解决的方法有两类,即启发式技术和数学优化技术。

启发式方法就是构造出某些性能指标来反映系统架线过程。如 Meliopoulos<sup>[2]</sup>提出的“加线化”和 El-Sobki<sup>[3]</sup>的“减线法”,它们虽然具有简单、迅速的优点,但最优排序并不能保证就是最优组合解。况且目前对各种启发式信息还没有一个比较全面的评价。

与启发式不同,数学优化方法是对网络规划问题进行数学模拟。按数学优化方法可分为连续变量方法和离散变量方法。前者忽略了架线问题的离散性,如文献[9]提出的功率费用法和文献[6]提出的非线性规划模型。由于它们无法真实反映架线的离散过程,故最后只能用循环的办法或再用离散模型求解,因而容易偏移最优解。后者则顾及到问题的离散性,如 Lee<sup>[7]</sup>的0—1整数规划模型和 Sharifnia<sup>[8]</sup>的混合整数规划方法。但它们或者不能准确反映实际架线过程或者是约束维数太大,从而使其在实际规划部门中难以应用。

上述讨论表明静态决策问题还没有得到很好的解决。

本文提出了一个解决静态决策的新方法。

# 1 支路追加法

## 1.1 网络模型

超高压输电网一般具有下述特点:

- (1) 各节点电压幅值接近 1.0 标么值;
- (2) 线路电阻远小于电抗, 可忽略不计;
- (3) 各线路两端电压相角差较小, 其三角函数值可用其一次项近似。

这样, 实际输电网规划中, 可用直流潮流方程计算。

直流潮流方程可描述为:

$$P = B\theta \quad (1)$$

## 1.2 支路追加法

对于架线消除过载过程, 我们可以从式(1)推导出线路潮流  $P_{ij}$  与  $B$  的关系是离散的、非线性的。若把线路功率极限约束用  $\theta_{ij}$  来表示, 则将式(1)改写成

$$\theta = ZP \quad (2)$$

当  $P$  固定时, 架线过程可以看成追加支路修改节点阻抗矩阵过程。因此, 按照原理, 实际架线可分为:

### 1.2.1 追加树枝

这相当于系统有孤立节点的情况, 处理方式述于下节。

### 1.2.2 追加连支

假设原有网络节点阻抗矩阵为  $Z$ , 当追加阻抗值为  $\Delta z_{ij}$  的  $ij$  连支后, 新的阻抗矩阵中各元素都发生变化。这时, 第  $m$  行  $n$  列元素为:

$$Z'_{mn} = Z_{mn} - Z_{Lm}Z_{Ln} / (Z_{ij-ij} + \Delta z_{ij}) \quad (3)$$

$$\text{其中 } Z_{Lm} = Z_{im} - Z_{im}, \quad Z_{ij-ij} = Z_{Li} - Z_{Lj} \quad (4)$$

它对现存支路  $kl$  的角度影响为:

$$\Delta\theta_{kl} = K_{kl-ij}\theta_{ij} \quad (5)$$

$$\text{其中 } \Delta\theta_{kl} = \theta_{kl}' - \theta_{kl} \quad (6)$$

$$K_{kl-ij} = -\frac{Z_{kl-ij}}{Z_{ij-ij} + \Delta z_{ij}} \quad (7)$$

显然, 只架设一条线路时, 式(5)是准确的, 但当架设一组线路后, 这时既引起线路相角差的变化, 也引起端口阻抗元素  $Z_{kl-ij}$ 、 $Z_{ij-ij}$  的改变。这里只近似地考虑架设一组待选线对其它待选线端口的角度差影响, 我们可写为:

$$\Delta\theta_{ij} = \sum_{Pq} K'_{ij-Pq}\theta_{Pq}x_{Pq}$$

$$x_{Pq} = 0, 1 \quad ij, Pq \in A^n \quad (8)$$

$$\text{其中 } \begin{cases} K'_{ij-Pq} = 0 & \text{当 } Pq = ij \\ K'_{ij-Pq} = K_{ij-Pq} & \text{当 } Pq \neq ij \end{cases} \quad (9)$$

因此, 我们可以得到整个系统的过载约束方程。

### 1) 过载线约束

架线消除过载可以表示为使过载线的相角差满足下述约束:

$$|\theta_{kl} + \Delta\theta_{kl}| \leq \bar{\theta}_{kl} \quad kl \in A^o \quad (10)$$

$$\text{令 } \begin{cases} \theta_{kl}^n = \bar{\theta}_{kl} - \theta_{kl} \\ \theta_{kl}^m = -\bar{\theta}_{kl} - \theta_{kl} \end{cases} \quad (11)$$

则式(10)可改写成:

$$\theta_{kl}^m \leq \Delta\theta_{kl} \leq \theta_{kl}^n \quad (12)$$

另外, 结合式(5), (8)可得:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{kl} &= \sum_{ij} K_{kl-ij}(\theta_{ij} + \Delta\theta_{ij})x_{ij} \\ x_{ij} &= 0, 1, \quad kl \in A^0, \quad ij \in A^n \end{aligned} \quad (13)$$

## 2) 待选线约束

为对待选线施加约束, 有:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{ij} + U \cdot x_{ij} &= \sum_{Pq} K'_{ij-Pq} \theta_{Pq} x_{Pq} \leq \theta_{ij}^n + U \\ x_{Pq}, x_{ij} &= 0, 1, \quad ij, Pq \in A^n \end{aligned} \quad (14)$$

其中  $U$  是任意的非常大的正数

$$\begin{cases} K'_{ij-Pq} = K_{ij-ij} + U/\theta_{ij} & \text{当 } Pq = ij \\ K'_{ij-Pq} = K_{ij-Pq} & \text{当 } Pq \neq ij \end{cases} \quad (15)$$

式(14)解释如下: 当  $x_{ij}=1$ , 即需要架设待选线  $ij$  时, 式(14)退化为:

$$\Delta\theta_{ij} = \sum_{Pq} K_{ij-Pq} \theta_{Pq} x_{Pq} \leq \theta_{ij}^n, \quad ij, Pq \in A^n \quad (16)$$

式(16)就是对待选线  $ij$  施加正向过载约束。当  $x_{ij}=0$ , 即不需要架设待选线  $ij$  时,

$$\Delta\theta_{ij} \sum_{\substack{Pq \\ Pq \neq ij}} K_{ij-Pq} \theta_{Pq} x_{Pq} \leq \theta_{ij}^n + U \quad x_{Pq} = 0, 1, \quad ij, Pq \in A^n \quad (17)$$

由于  $U$  非常大, 式(17)总是成立的, 即这时  $\Delta\theta_{ij}$  的限制就由其他约束所制约。

尽管架线是一个多目标优化问题, 但考虑到表达、求解诸如可靠性、社会和环境等问题的复杂性, 我们这里也是取投资最省为目标, 以可靠性作为检验方案的手段。这样, 结合式(8), (12), (13), (14), 即可写出我们称之为“支路追加法”的架线消裁数学模型:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= \sum_{ij} C_{ij} x_{ij} \\ \text{s. t. } \theta_{kl}^m &\leq \sum_{ij} K_{kl-ij}(\theta_{ij} + \Delta\theta_{ij})x_{ij} \leq \theta_{kl}^n \quad kl \in A^0 \\ &\sum_{Pq} K'_{ij-Pq} \theta_{Pq} x_{Pq} \leq \theta_{ij}^n \quad ij \in A^n \\ \Delta\theta_{ij} &= \sum_{Pq} K'_{ij-Pq} \theta_{Pq} x_{Pq} \quad Pq \in A^n \\ x_{ij}, x_{Pq} &= 0, 1 \end{aligned} \quad (18)$$

### 1.3 方法的特点:

1.3.1 隐含了  $DC$  方程, 较为真实地模拟实际架线过程。

1.3.2 当  $ij$  为多回线或不同类型线路(如电缆和架空线), 它们的电气参数  $\Delta_{ij}$  各不相同, 则这时可以分别用不同的 0—1 变量表示:

$$\Delta\theta_{kl} = \sum_t \frac{Z_{kl-ij}}{Z_{ij-ij} + \Delta_{ij} x_{ijt}} \theta_{ij} \cdot x_{ijt} \quad (19)$$

其中  $t$  是不同的 0—1 变量。所以, 它不象文献 [9] 那样不能反映待选线的回数 and 类型, 而是准确反映了待选线具有不同电气参数时的情况。

1.3.3 用整数规划模型求解实际网络规划时, 很可能出现该数学模型可行, 而用直流潮流

流校验时并不可行的方案,这时需对0—1隐枚举法进行一些变动,在算计过程中增加对模型可行解进行直流潮流校验的步骤。只有在满足直流潮流约束时才认为是可行的,否则就追加约束继续求解。上述模型虽然是非线性0—1整数规划,但由于其独特的结构方式,当用隐枚举法求解时,与常规的线性0—1整数规划相比,编程时变化不大,却节约了计算时间。

1.3.4 正是由于它考虑了待选线阻抗 $\Delta z_{ij}$ 的影响,使其具有处理孤立节点的能力。

## 2 孤立节点的处理

孤立节点主要是指新增电厂或负荷点的情况。由于它与原来系统没有电气联系,故这时无法直接进行网络分析。本节的目的是讨论在这种情况下,如何确定带孤立节点的输电网规划问题。

设节点*i*是孤立节点,其注入功率为 $P_i$ ,*j*、*m*是其落点,则在*ij*上架设阻抗为 $\Delta Z_{ij}$ 的虚拟线( $\Delta Z_{ij} \gg \Delta z_{ij}$ ),功率极限为:

$$\bar{P}'_{ij} \leq \frac{\Delta z_{ij}}{\Delta Z_{ij}} \bar{P}_i \quad (20)$$

这时有:

$$\begin{cases} Z_{ij-ij} \cong \Delta Z_{ij} \\ Z_{im-im} \cong \Delta Z_{ij} \\ Z_{ij-im} \cong \Delta Z_{ij} \\ \theta_{ij} \cong \Delta Z_{ij} P_i \\ \theta_{im} \cong \theta_{ij} \end{cases} \quad (21)$$

从式(5)、(7)可见这时架设*ij*线与架设*im*线对虚拟线*ij*来说消除过载效果相差不大,故可只讨论架设*ij*线的情况。

$$\theta'_{ij} = \theta_{ij} + \Delta \theta_{ij} \quad (22)$$

$$\theta'_{ij} = \frac{\Delta z_{ij}}{1 + \Delta z_{ij} / \Delta Z_{ij}} P_i \quad (23)$$

所以: 
$$\lim_{\Delta Z_{ij} \rightarrow \infty} \theta'_{ij} = \Delta z_{ij} P_i \quad (24)$$

结果表明 $\Delta Z_{ij}$ 较大时,架设待选线后,孤立节点就被正式接入系统,且满足式(24)的关系。在此基础上,我们同样可以考虑再架设其它待选线,其过程与上节相同,不再重复。

另外, $\Delta Z_{ij}$ 不必象文献[4]那样取 $\Delta Z_{ij} = 10^4$ ,只要满足:

$$\Delta Z_{ij} : \Delta z_{ij} = 10 : 1 \quad (25)$$

即可,太大的值只会给计算带来不必要的误差。

讨论表明用支路追加法处理含孤立节点的输电网规划问题时,模型本身就自动地找出整个系统的架线最优方案。

## 3 计算实例

[算例1] IEEE 6节点、5条线路的系统<sup>[5]</sup>。其中在2—6处架上比原待选线阻抗大10倍的虚拟线使其变成相联系统。它共有9个待选线端口、24个0—1变量。得到的不考虑“N—1”安全校验时的结果如表1,形成的最终网见图2。结果与文献[5]完全一致。





本例共有 15 个待选线端口、26 个 0—1 变量，结果如表 2。算例表明支路追加法能够解决实际输电系统网络规划问题，而且与 Lee 提出的 0—1 整数规划方法相比，节省了 CPU 时间。

#### 4 结论

(1) 支路追加法可较为迅速地一次求取整个输电系统的架线方案。它和以往的整数规划模型相比，节约了计算时间。

(2) 理论分析和算例表明了对于含孤立节点的架线规划问题，只要加上阻抗比原有待选线路阻抗大 10 倍左右的虚拟线，使其变成相联系统后，该模型就具有自动考虑含孤立节点的网络规划的能力。

(3) 本文研究输电网中长期规划的静态决策问题，结合动态决策解决方法即可用来解决输电网的中长期规划问题。

#### 参 考 文 献

- [1] U. G. Knight, IEE Proc. Pt. A. Vol 33, 1960. 306—319
- [2] A. P. Meliopoulos, IEEE Trans, PAS-101, 1(1982), 53—59
- [3] S. M. El-Sobki, IEE Proc. Pt. c. Vol. 133, 6(1986), 256—262
- [4] A. Monticelli, IEEE Trans, PAS-101, 10(1982), 3919—3925
- [5] L. L. Garver, IEEE Trans, PAS-89, 9/10(1970), 1688—1697
- [6] W. R. Puntel. PICA Conf. Proc., 6(1973), 38—46
- [7] S. T. Y. Lee, IEEE Trans. PAS-93, 9/10(1974), 1390—1400
- [8] A. Sharifnia. IEEE Trans. PAS-104, 8(1985), 2026—2034
- [9] 黄眉 王仲鸿 韩英铎 童陆园 周贵安: 输电网规划的初步算法, 《清华大学学报》, 27 卷 10 期, 1987 年 pp.50—58

# 城市电网规划中变电站容量的动态优化

杨期余

(湖南大学)

张仲力

(湖南省水电学校)

杨明志

(长沙电业局)

李平之

(湖南省电力局)

## 0 引言

电力网规划的动态优化问题,是当前国内外正在研究的重要课题。本文针对城市电力网的特点,从输变电工程建设的实际投资过程出发,计及资金的时间效益和原有电网元件的使用年限,采用 Bellman 动态规划原理,导出了求解 110kV 变电所主变压器经济容量的数学模型,并在 IBM 微机上编制和调试好一套实用程序,通过对长沙电网的计算,其结果是令人满意的。

## 1 动态模型的建立

众所周知,城市电力网供电范围内的负荷分布比较均匀,国内外常用面负荷密度  $\sigma$  来表示。从宏观上分析,电力网应随着负荷的增长而不断发展。在某一负荷水平下,原有变电所个数及容量应与其相匹配。随着时间的推移,供电区内的负荷逐渐增加;伴随着负荷变化的动态过程,在原网络基础上,变压器容量、台数以及馈电线条数都要随之变更直至完善。这一完善过程包含两个子过程:一方面因变电所过负荷而导致新变电所建设或原有变电设备增容,显然,这一子过程发展的快慢主要取决于负荷的增长速度;另一方面,在整个规划期内,不可避免地会出现原有变电所主变因使用年限到期而退役的问题,更换这些设备也需要投资,尽管这一子过程与负荷增长程度无关,但也会给整个投资过程带来影响。

现将上述两个子过程拟合在一起,建立起整体的动态规划的数学模型。

设规划期为  $T$  年(即投资有效期)。若将它分为  $n$  个时段,则每个时段有  $t$  年(即投资周期)。

$$t = \frac{T}{n} \quad (1)$$

又设面负荷密度在  $T$  时域内按指数规律增长,初值为  $\sigma_0$ ,增长率为  $\alpha$ ,则在第  $K$  个时段末有

$$\sigma_K = \sigma_0(1 + \alpha)^{Kt} \quad (2)$$

同理

$$\sigma_{K-1} = \sigma_0(1 + \alpha)^{(K-1)t} \quad (3)$$

从而得

$$\sigma_K = \sigma_{K-1}(1 + \alpha)^t \quad (4)$$

在第 $K$ 时段初, 设每单位面积上已有 $N_K$ 个变电所, 但在此阶段, 将有容量为 $W_K$ 的变压器因寿命到期而要退役, 把 $W_K$ 折算到 $K$ 时段初经济容量 $S_{K-1}$ 下单位面积上的个数为

$$Q_K = \frac{W_K}{S_{K-1}G} \quad (5)$$

式中 $G$ 为规划区域面积。此时,  $K$ 时段的状态变量就为 $(N_K - Q_K)$ 。

随着负荷增长, 本时段单位面积上将新增 $\Delta N_K$ 个变电所。令 $\Delta N_K$ 为决策变量, 即状态转移方程为

$$N_{K+1} = N_K - Q_K + \Delta N_K \quad (6)$$

如果令整个规划期始末单位面积上变电所个数分别为 $N_1$ 和 $N$ , 则下列关系成立:

$$N = N_1 + \sum_{K=1}^n \Delta N_K - \sum_{K=1}^n Q_K \quad (7)$$

在第 $K$ 时段单位面积上变电设备所发生的费用, 显然是本时段新建 $\Delta N_K$ 个变电所(包括原有变电所增容及变电所馈电线路)的投资和运行费用, 以及 $(N_K - Q_K)$ 个变电所在本时段所产生的运行费用之和。

设 $A(\Delta N_K, N_K, Q_K)$ 为第 $K$ 时段新建设备(变电所及其馈线)的投资折算到 $K$ 时段末的计算值,  $B(\Delta N_K, N_K, Q_K)$ 表示原有的及新增的设备运行费之和折算到 $K$ 时段末的计算值。则第 $K$ 时段单位面积上总费用折算到本时段末的计算值为:

$$f(\Delta N_K, N_K, Q_K) = A(\Delta N_K, N_K, Q_K) + B(\Delta N_K, N_K, Q_K) \quad (8)$$

上式表明, 投资和年运行费都是决策变量 $\Delta N_K$ 和状态变量 $N_K, Q_K$ 的函数。下面详细说明 $A(\Delta N_K, N_K, Q_K)$ 和 $B(\Delta N_K, N_K, Q_K)$ 的表达式。

投资和运行费的项目主要考虑变电所主变及其10kV馈线。

$$A(\Delta N_K, N_K, Q_K) = (C_B + C_L) \left[ 1 - \beta^{(n+1-K)t} \left( 1 - \frac{n+1-K}{T_S} t \right) \right] \cdot \beta^{-t} \quad (9)$$

式中 $C_B, C_L$ 分别表示单位面积上变电所主变及馈线的投资, 当变电所的10kV供电区为圆形, 变电所置于圆心, 馈线采用等截面的辐射结构时, 就有

$$C_B = \Delta N_K a_1 + \left( \frac{\sigma_K a_1}{\cos \varphi} + \frac{W_K}{G} \right) b_1 \quad (10)$$

$$C_L = \frac{D(\sigma_K a_1 + W_K \cos \varphi / G)}{\sqrt{\pi(N_K - Q_K + \Delta N_K)}} \left( \frac{a_2}{P_L} + \frac{b_2}{\sqrt{3} U_N J \cos \varphi} \right) \quad (11)$$

上式中的 $a_1, b_1$ 分别表示与变压器容量无关及有关部分的投资,  $a_2, b_2$ 分别表示与导线截面无关及有关部分的投资,  $\cos \varphi$ 为负荷的功率因数,  $D, P_L, U_N, J$ 分别表示馈线的弯曲系数、平均负荷、额定电压、经济电流密度,  $\alpha_1 = 1 - \frac{1}{(1+\alpha)^t}$ 。

(9)式中方括号以后的系数是考虑资金时间效益以及规划期外的投资对规划期无影响时所求得的系数, 其中,  $T_S$ 为设备使用期,  $\beta = \frac{1}{1+i}$ ,  $i$ 为投资的年收益率。

单位面积上的年运行费包括维修、折旧费 $C_1$ 以及电能损耗费用 $C_2$ 两部分, 即

$$B(\Delta N_K, N_K, Q_K) = C_1 + C_2 \quad (12)$$

$$C_1 = H\beta^{1-t} \frac{1-\beta^t}{1-\beta} \left[ (N_K + \Delta N_K - Q_K) a_1 + \frac{\sigma_K b_1}{\cos \varphi} + \frac{D\sigma_K}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{a_2}{P_L} + \frac{b_2/\cos \varphi}{\sqrt{3} U_N J} \right) (N_K + \Delta N_K - Q_K)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (13)$$

$$C_2 = 9.24 \times 10^{-4} \frac{D\rho J \tau C_0 \sigma_K}{\sqrt{\pi} U_H \cos \varphi} \times \frac{1 - (1+\alpha)^{2t} \beta^t}{(1+\alpha)^{2t-2} [\beta^{t-1} - (1+\alpha)^2 \beta^t]} (N_K + \Delta N_K - Q_K)^{-\frac{1}{2}} \quad (14)$$

上面各式中,  $\rho$  为导线电阻系数,  $\tau$  为损耗小时,  $C_0$  为损耗电价, 其它符号与 (9)、(10)、(11) 式相同。

根据 Bellman 动态规划原理, 最优策略是对任何一个时段  $K$ , 在满足负荷需要的前提下, 使前面各段的投资与运行费之和折算到  $K$  时段末的计算值为最小。其递归函数为

$$g_K(N) = \min_{0 < \Delta N_K < N} \{f(\Delta N_K, N_K, Q_K) + \beta^{-t} g_{K-1}(N)\} \quad (15)$$

式中  $g_K(N)$  为第  $K$  时段及该时段前为保证整个规划期决策取最优策略时费用函数的最小值。

同时, 我们假设规划初期的状态对应于原有网络, 从而得到边界条件为

$$g_1(N) = \sum_{i=1}^M E_i Z_i \beta^{-(T_s - Z_i)/T_s} \quad (16)$$

式中  $M$  为原有电网设备数之和,  $E_i$  为原有设备投资,  $Z_i$  是设备还可利用的残年,  $Z_i = T_s - (T_1 - T_2)$ ,  $T_1, T_2$  分别表示规划年和投产年序号。

上述分析表明, (6)、(7)、(15)、(16) 已构成了求决策变量  $\Delta N_K$  和状态变量  $N_K$  的动态规划模型。再由下式就可求出变电所的经济容量  $S_K$  和供电半径  $R_K$ , 即

$$S_K = \frac{\sigma_K}{\cos \varphi (N_K + \Delta N_K)} \quad (17)$$

$$R_K = \frac{1}{\sqrt{\pi (N_K + \Delta N_K)}} \quad (18)$$

## 2 动态模型的求解

求解 (15) 式实质上是一个多变量函数的最优决策问题。显然, 当  $K=1$  时,  $g_1(N) = f_1(N)$ , 利用 (15) 式可依次求出  $g_2(N), g_3(N), \dots, g_n(N)$  的表达式, 就可解得  $\Delta N_K, N_K$ , 从而确定出  $S_K$  和  $R_K$ 。

现在, 令

$$x_1 = \frac{D}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{a_2}{P_L} + \frac{b_2/\cos \varphi}{\sqrt{3} U_N J} \right), \quad x_2 = 9.24 \times 10^{-4} \frac{D\rho J \tau C_0}{\sqrt{\pi} U_N \cos \varphi}$$

$$x_3 = H\beta^{1-t} \frac{1-\beta^t}{1-\beta}, \quad x = x_3 a_1$$

$$x_0 = \frac{1 - (1+\alpha)^{2t} \beta^t}{(1+\alpha)^{2t-2} \beta^{t-1} [1 - (1+\alpha)^2 \beta]}$$

$$x(K) = \left[ 1 - \beta^{(n+1-K)t} \left( 1 - \frac{n+1-K}{T_S} t \right) \right] \beta^{-t}$$

$$x_1(K) = x(K)x_1$$

$$x_2(K) = x(K)b_1 \left( \frac{\sigma_K \alpha_1}{\cos \varphi} + \frac{W_K}{G} \right) + x_5 \frac{b_1 \sigma_K}{\cos \varphi}$$

$$x_3(K) = x(K)x_1(\sigma_K \alpha_1 + W_K \cos \varphi / G) + \sigma_K(x_1 x_5 + x_2 x_6)$$

则(15)式就变为:

$$g_K(N) = \min_{0 < \Delta N_K < N} \{ x_1(K) \Delta N_K + x_2(K) + x_3(K) (N_K + \Delta N_K - Q_K)^{-\frac{1}{2}} + x(N_K + \Delta N_K - Q_K) + \beta^{-t} g_{K-1}(N) \} \quad (19)$$

当  $K=1$  时, 由  $\frac{df_1(N)}{d\Delta N_1} = 0$ , 得

$$\Delta N_1 = N + W_1 - x_4(1)^{\frac{2}{3}}$$

$$g_1(N) = x_1(1) \Delta N_1 + x_2(1) + x_3(1) N^{-\frac{1}{2}} + xN + \beta^{-t} Q(1)$$

当  $K=2$  时, 由  $\frac{df_2(N)}{d\Delta N_2} = 0$ , 得

$$\Delta N_2 = N + W_2 - x_4(2)^{\frac{2}{3}}$$

$$g_2(N) = x_1(2) (N + W_2 - x_4(2)^{\frac{2}{3}}) + x_2(2) + x_3(2) N^{-\frac{1}{2}} + xN + \beta^{-t} [Q(2) + \beta^{-t} Q(1)]$$

同理, 当  $K=i$  时, 由  $\frac{df_i(N)}{d\Delta N_i} = 0$ , 得

$$\Delta N_i = N + W_i - x_4(i)^{\frac{2}{3}}$$

$$g_i(N) = x_1(i) [N + W_i - x_4(i)^{\frac{2}{3}}] + x_2(i) + x_3(i) N^{-\frac{1}{2}} + xN + \beta^{-t} \{ Q(i) + \beta^{-t} \{ Q(i-1) + \dots + \beta^{-t} [Q(2) + \beta^{-t} Q(1)] \dots \} \}$$

式中  $x_4(i) = \frac{x_3(i-1)}{2x_1[x_1(i-1) + x - \beta^t x_1(i)]}$

$$Q(i) = \{ x_1(1) [x_4(i)^{\frac{2}{3}} + W_{i-1} - x_4(i-1)^{\frac{2}{3}}] + x_2(i-1) + x_3(i-1) x_4(i)^{-\frac{1}{3}} + x x_4(i)^{\frac{2}{3}} \}$$

通过上述过程求解, 最后确定出第  $n$  时段末的变电所最优个数  $N$  为:

$$N = \left[ \frac{x_3(n)}{x_1(n) + x} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (20)$$

再通过(6)、(7)式逐步回代, 求得第  $K$  时段初最优变电所个数为:

$$N_K = x_4(K)^{\frac{2}{3}} \left[ \frac{x_3(K-1)}{2x_1(x_1(K-1) + x - \beta^t x_1(K))} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (21)$$

$$\Delta N_K = N_{K+1} - N_K + Q_K \quad (22)$$

将上面两式代入(17)、(18)式, 就可求出  $S_K$ ,  $R_K$ 。

### 3 计算实例及结果分析

现以长沙电网为例, 根据近几年城网建设的实际情况, 上述参数取值如下:

$T=25$  年,  $T_s=20$  年,  $i=0.1$ ,  $\cos\varphi=0.9$ ,  $\tau=2400$  小时,  $D=1.3$ ,  $C_0=0.06$  元/度,  $H=5.1\%$ ,  $\rho=31.5\Omega/\text{mm}^2\cdot\text{km}$ ,  $U_N=10\text{kV}$ ,  $J=1.1/\text{mm}^2$ ,  $a_1=510000$  元,  $b_1=50$  元/kVA,  $a_2=18640$  元/km,  $b_2=89$  元/km $\cdot\text{mm}^2$ ,  $\alpha=7.5\%$ ,  $\sigma_0=2600\text{kW}/\text{km}^2$ ,  $\sigma_n=14749\text{kW}/\text{km}^2$ 。计算结果见表 1。

表 1 变电所经济容量及供电半径

投资周期 $t = \frac{T}{n}$ 年	1	2	3	4	5
变电所经济容量 kVA	83241	80217	76441	72843	71108
变电所供电半径 km	1.271	1.248	1.22	1.19	1.13

上述结果与参考文献[2]的静态模型计算结果比较, 对应与同一规划负荷密度条件下, 动态模型求出的变电所经济容量要大一些。这样, 同一供电区设置的变电所个数将减少, 相应地 110 千伏网络会简化, 变电所和线路走廊占地也会减少, 这对受环境条件限制的城区, 将带来很大的好处。由于本文所反映的投资过程是随负荷增加而逐步发生在规划期中的动态过程, 因此, 所获得的城市 110 千伏变电所经济容量将更接近于实际工程。同时, 实际计算中发现, 考虑了设备退役容量  $W_K$  后, 计算结果也有所变化。

### 参 考 文 献

- [1] 高桥一弘: 電力システム工学, コロナ社, 1977
- [2] 王学众: 二次变电所的经济供电半径, 《电力技术》, 1985
- [3] J. C. Lemoine, G. Caucheteux: Theoretical laws of the development of urban distribution systems, IEEE, 1980

# 城市民用能源优质化方向探讨

## ——电气化优于煤制气化

林家豪

(天津大学)

### 0 引言

在减少环境污染方面,煤制气确比直接烧煤前进了一大步。但由于我国经济体制目前仍存在一些问题,投资部门分割,民用能源售价并不真正反映其实际价值。除有充足的天然气、液化石油气、高炉煤气等可供利用的地区外,在考虑民用能源优质化时,究竟应发展煤制气还是加快发展电力,应从其实际经济效果作全面的考虑。

### 1 电能需求的增长是世界性趋势

经济发达国家的能源消费有一重要特点,就是以电能形式消费的比例很大,而且越来越大。例如美国,1920年能源消费中电能只占3%;1985年则已增至35.9%。1979年以来,美国能源总消费量不断下降,由78.9 Quads( $10^{16}$ Btu)降至1985年的73.8 Quads。但同期的电能消费量却增长了11.5%<sup>[1][2]</sup>。近20年来,世界电能消费量的平均年增长率为5.4%,大大超过总能源消费量年平均3%的增长率。表1<sup>[3]</sup>为一些国家能源消费中的电能化趋势。

表1 一些国家发电能源在一次能源总消费中的比例(%)

国家 年份	全世界	美国	苏联	日本	加拿大	西德	法国	英国	中国
1960	20.0	18.7	26.5	25.0		22.0	21.0	24.0	10.9
1970		24.4	32.3	25.4		25.0	26.6	33.0	18.3
1975	24.6	28.9		28.3	36.0	29.0		34.3	19.4
1980		32.2	33.3	32.3	(1977)	31.6		34.6	20.6
1982		34.0	34.2	32.6			33.4		21.4
1985		35.9		34.0	41.0	34.0	35.5	35.0	

值得注意的是:发达国家的电能消费中有相当大部分是家庭用电。例如美国1986年家庭用电占全部电能消费的35%,日本1985年为27.3%。

1982年我国能源消费中电能为21.4%,而全部电能消费中市政生活用电只占6.1%,其中直接用于家庭的比例更小。多年来我国城市民用能源始终以直接烧煤为主。表2为1983年



中、美民用能源消费结构比较。

表 2 1983年中、美民用能源消费结构(%)

国家 \ 能源	煤炭	石油	天然气	电能
中 国	90.6	1.2	2.4	5.8
美 国	0.7	9.0	27.8	62.5

居民大量使用煤炭是造成城市大气污染的重要原因之一。我国城市空气的污染程度已相当于发达国家 50、60 年代污染最严重的时期<sup>[6]</sup>。其中最直接的影响是癌症发病率的增加。如天津市 1976—1980 年间全市癌症死亡率比 1973—1975 年高 20%，其中肺癌增加最快，达 50%。

随着近年我国城市居民收入的提高和居住条件的改善，人们对清洁的优质能源的需求十分迫切。家庭炊事用能电气化或燃气化已成为不可阻挡的趋势。特别是一些沿海开放城市，实际上已进入部分使用电炊阶段。如广州市几乎家家都有电饭煲，有些家庭还装了电热水器，民用电价即使高达 0.22—0.5 元/度，亦无法限制市民消费。全市 1978—1982 年市政生活用电量平均年递增率达 21.7%。1984 年人均市政生活用电 213 度<sup>[5]</sup>。然而，近 20 年来，我国缺电情况严重。目前全国缺少装机容量 1500 万千瓦，缺电量 700 亿度<sup>[6]</sup>。发展电炊，各方面的阻力很大。但要解决我国民用烟煤型大气污染，主要途径只有靠发展电炊或炊事燃气化。

## 2 发展煤制气出现的问题

天津市目前已实现了全市民用燃气化，气化率达 93.7%，跃居全国首位。全市大气低空污染状况将会有显著改善。但在天津的 93.23 万气化户中，只有 30 万户系由西郊、东郊两煤制气厂（基本情况见表 3）提供气源。

表 3 天津市西郊、东郊煤制气厂基本情况

项 目	厂 名		西郊煤制气厂	东郊煤制气厂
	单 位	工 艺 流 程	伍德炉制气	焦炉制气
1	产气量	万 m <sup>3</sup> /日	28	60
	其中供民用	%	60	50
2	供民用户数	万户	10	20
3	设计热值	大卡/m <sup>3</sup>	3500	4000
4	煤气厂实际投资	万元	13000	30000
	建设工期	年	3	3
5	输气管网实际投资	万元	7834	14400
	建设工期	年	1	1
6	平均每户需国家投资	元/户	1250	1110

注：不包括进户管道、表计及炊具投资