



PROCEEDING
CUS-EPSSA
1986

全国高等学校
电力系统及其自动化专业
第二届学术年会论文集



西安交通大学出版社

全国高等学校

电力系统及其自动化专业

第二届学术年会论文集

从门课中抽出了长，并育学本的价值高本一夫，近米件工和半林咏半等许多主
 上近年来的研究，为国家和社。到会代表中后起之秀不断涌现，许多青年教师和在老教师
 师的指导下写出了高质量的文章。会议认为，这种学术交流对促进各校专业科学研究和教学
 水平的提高，以及推动我国电力事业的发展将起到重大的作用。

年会还安排了一定时间进行分组座谈，交流各校在教学管理，研究生培养和科学研究等
 方面的经验和改革情况。通过座谈，各校之间、中老年教师与年轻同志之间互相学习，互相
 启发，加强了相互的联系。在讨论中，代表们认为，高等院校对促进我国电力事业的发展，特
 别是在“七五”规划的有关研究课题中，应该充分发挥其作用，做出更大的贡献。

经年会书记，决定出版第二届学术年会论文集。限于人力和财力，在宣读过的论文中
 选出三十篇论文全文刊登，其余论文，不论宣读与否，只要未公开发表过或未在其它专业
 学术会议上宣读过，均编录刊登。由于部分作者未能按期寄出稿件或稿件质量原因，因此本论
 文中尚缺少部分论文和插图。

由于时间仓促，且限于水平，对学报高国全及之处，敬请读者见谅。

业安分依自其及聚系代中
 案文会会平朱学器二第

兰 夏 群 编 书 责

编出并编出学本等器器学校电力系统及其
 (号 88 编定编定第第)
 籍中(册印出编出半大能文交西 第二届学术年会
 册发国中半第第各 行发国中半第第西第 1987年七月

字平 613 维字 253.11 册印 811 5001×1787 本第
 1987年8月10日 册印 1 册印 8 册印 1987
 册 0001—0000 册印

西安交通大学出版社

内 容 提 要

本论文集搜集了1986年10月19日至24日在华中工学院召开的“全国高等学校电力系统及其自动化专业第二届学术年会”上宣读讨论和交流的论文全文28篇和论文摘要50篇。这些论文和摘要比较全面地涉及到电力系统规划及可靠性、电力系统稳态运行方式及其控制、电力系统稳定性分析及控制、电力系统继电保护及自动控制等各个方面，它们紧密结合我国电力建设和国际上近年来新的研究方向，反映了我国高等学校电力系统及其自动化专业科学研究的成果。

本论文集对于高等学校电力系统及其自动化专业教师、大学高年级学生和研究生进行教学和科学研究工作来说，是一本很有价值的参考资料，并可供电力部门从事设计、运行及科学研究的工程技术人员和研究人员参考。

全国高等学校 电力系统及其自动化专业 第二届学术年会论文集

责任编辑 罗兰

*

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 11.625 字数: 279 千字

1987年6月第1版 1987年10月第1次印刷

印数: 1—2600 册

ISBN7-5605-0077-3/TK-12

书号: 15340·128

定价: 2.60 元

前 言

全国高等学校电力系统及其自动化专业第二届学术年会于一九八六年十月十九日至二十四日在华中工学院召开，出席年会的有来自全国三十三所高等学校的代表共一百零七人。水利电力部所属部分单位的代表也出席了会议。

本届年会的主要内容是学术交流。年会共收到学术论文一百二十七篇，其中六十九篇论文按课题的研究方向分三组同时进行了宣读和讨论。其余论文由于代表名额和会议时间的限制等原因，未能在会议上宣读，但这些论文都已在会议上散发给代表进行了交流。

年会学术空气活跃、讨论热烈。所收到的论文比较全面地涉及到本专业的各个方面，反映了近一、两年来各校的部分科研成果。其中有的已经或即将用于生产实际，有的属于国际上近年来新的研究方向和课题。到会代表中后起之秀不断涌现，许多青年教师和研究生在导师的指导下写出了高质量的文章。会议认为，这种学术交流对促进各校今后科学研究和教学水平的提高，以及推动我国电力事业的发展将起到重大的作用。

年会还安排了一定时间进行分组座谈，交流各校在教学管理，研究生培养和科学研究等方面的经验和改革情况。通过座谈，各校之间、中老年教师与年轻同志之间互相学习、互相启发，加强了相互的联系。在讨论中，代表们认为，高等院校对促进我国电力事业的发展，特别是在“七五”规划的有关研究课题中，应该充分发挥其作用，做出更大的贡献。

经年会讨论，决定出版第二届学术年会论文集。限于人力和财力，在宣读过的论文中评选出三十篇论文全文刊登，其余论文，不论宣读与否，只要未公开发表过且未在其它全国性学术会议上宣读过，都摘要刊登。由于部分作者未能按期寄出稿件或其它原因，因此本论文集中尚缺少部分论文和摘要。

由于时间仓促，且限于水平，对论文集集中的不妥之处，敬请读者见谅。

全国高等学校电力系统及其自动化专业第二届学术年会

1987年元月

目 录

电力系统规划及可靠性

- 1. 关于输电系统长期扩展规划的综述.....田 青 孙启宏 (1)
- 2. 输电规划——一种灵敏度分析与分枝定界法结合使用的方法.....周勤慧 (7)
- 3. 电力系统联网效益分析.....侯照光 熊信良 周勤慧 胡能正 (12)
- 4. 高压直流系统可靠性评估中的参数灵敏度分析
.....冉 立 黄雯莹 任 震 (17)

电力系统稳态运行方式及其分析控制

- 5. 含多端直流输电网络的AC/DC系统潮流计算.....汪馥英 (22)
- 6. 综合损失系数与 Multiplier 方法在水火系统最优调度中的应用
.....教泽峰 杨毅刚 (28)
- 7. 解耦优化潮流算法——电路法经济调度的发展.....骆齐寿 (33)
- 8. 水火电力系统经济调度的分解、协调算法——水电子系统的网流法应用
.....韦 化 (38)
- 9. 电力系统无功静态安全域.....黄纯华 余贻鑫 葛少云 (45)
- 10. 电力系统静态安全分析的外部系统分层等值.....王 锋 杨秀台 (51)
- 11. 大型电站超高压母线电压及全厂无功功率的最优实时控制
.....陈 忠 郭嘉阳 (58)

电力系统稳定性分析及控制

- 12. 同步发电机组调速系统仿真.....郑玉森 (63)
- 13. 电力系统阻尼特性的分析与探讨——一种长周期振荡阻尼分析的方法
.....何跃英 陈学允 (68)
- 14. 负荷静特性对低频振荡的影响.....鞠 平 马大强 (74)
- 15. 多机电力系统分散紧急控制.....卢 强 孙元章 王仲鸿 韩英铎 (79)
- 16. 励磁调节系统在小干扰稳定性中的协调作用.....陈自强 刁士亮 (84)
- 17. 多运行方式复杂电力系统稳定装置的最佳配置和参数协调
.....王 新 夏道止 (90)
- 18. 汽轮发电机失磁后异步运行分析.....杨嗣彭 胡明正 (96)
- 19. 应用同步电机电路参数模型对电力系统同步发电机失磁异步运行分析
.....岑文辉 黄家裕 甘庆森 董惠康 (103)

20. 电力系统的中期稳定和功率——频率过程的动态等值
王仲鸿 韩英铎 卢强 (113)

电力系统继电保护及自动控制

21. 多相补偿接地距离继电器分析计算.....陈实 姚晴林 (118)
22. 故障信息与继电保护.....葛耀中 王安定 (125)
23. 微型计算机失磁保护系统——样机研制、现场试验及抗干扰试验
易城 史世文 (129)
24. I_0 极化的接地电抗继电器运行特性分析.....陈德树 (138)
25. 一种改进的解微分方程阻抗算法——兼评几种精确测距算法
苏沛浦 刘娟芝 (143)
26. 卡尔曼滤波在高压线路故障测距中的应用.....王绪昭 (148)
27. 黎卡梯(Riccati)方程的简化迭代法及其在实时控制中的特殊解法
毛承雄 樊俊 (153)
28. 水轮发电机的快速跟踪同期控制
方勇杰 高国才 杨以涵 姚子文 (158)

论文摘要 (50篇)

- (82) 杨晓敏 李彩霞.....
- (88) 李永超.....
- (88) 升 杰.....
- (84) 云火强 孟强余 李庆英.....
- (12) 台永强 韩 王.....
- (88) 明嘉祥 忠 翔.....

附录及参考文献

- (89) 孙正洪.....
- (88) 李学超 姜亚利.....
- (17) 郑大品 平 峰.....
- (79) 韩英铎 赵外工 李天保 蔡.....
- (84) 李士丁 郑自湖.....
- (80) 王新夏 褚 王.....
- (80) 王阳路 褚晓刚.....
- (101) 康忠董 森永世 徐守英 程文家.....

关于输电系统长期扩展规划的综述

田青 孙启宏

(西安交通大学)

0 引言

近三十年, 计算机技术和数学优化技术的迅速发展, 有力地推动了输电系统长期扩展规划(缩写为 LRTP)研究的开展, 从已发表的大量文献中可以清楚地看到, 要进一步提高研究水平面临着两方面的困难: 计算机技术和数学优化技术的水平对求解大规模系统的能力的限制; 某些日益得到重视的工程、社会、环境因素定量模拟的困难。

本文试图对现有的 LRTP 研究的各种模型和算法进行初步评述。

1 输电系统长期扩展规划问题

LRTP 在理论上被定义为系统总体规划决策过程, 它包括电压等级选择和未来输电走廊的布局^[1]等。这个过程是为输电系统的未来发展提供整体框架而不直接处理具体扩展步骤。输电设备的投产日期、地点、技术特性等决策, 则由系统短期扩展规划过程来完成。但是, 有关文献表明, 几十年来 LRTP 研究实践并不是按照上述定义进行的。也就是说, LRTP 和短期扩展规划的主要区别仅仅在于规划周期的长短和需要数据及计算结果的粗细而已。

从问题的性质来说, LRTP 是个多目标、多阶段, 包括大量不确定性因素的离散性受约束的综合优化问题。这一问题的统一求解, 在理论上或技术上都还需要一段很长的时间。现有的各种规划算法只是对这些性质的一部分作近似的描述, 得到局部优化结论。

下面将对已经发表的一些 LRTP 模型做一般性整理和评述。

2 静态模型的构成

LRTP 的动态决策过程由各个阶段的静态决策过程构成, 因此, 必须建立单阶段 LRTP 模型, 即所谓静态模型。70 年代发表的大量文献归纳起来不外乎是模拟模型和数学优化模型两大类。这里仅对其中有代表性的模型作介绍和评论。

2.1 模拟模型^{[2][3][4]}

这种规划方法通过使用潮流计算、灵敏度分析以及系统经济评价等传统方法, 评价各种可行扩展方案。这种方法模拟传统的(人工计算)规划过程, 其内在逻辑可以用图 1 所示的框图来表达。

为了在决策过程中充分利用规划工程师的经验和技能, 模拟模型往往以“交互方式”进行^{[5][6][7]}, 即全部或部分决策功能交由上机人员完成, 构成人-机规划系统。

2.2 数学优化模型

单阶段的 LRTP 是一个有约束极值问题, 可以应用运筹学中的优化理论和求解算法来求解。近年来所发表的许多数学优化静态 LRTP 模型, 涉及到包括图论在内几乎所有的数学优

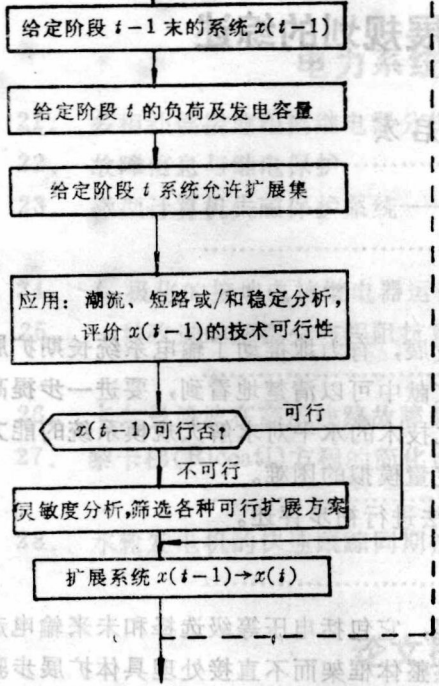


图 1 模拟模型框图

化技术, 与模拟模型相比, 数学优化模型在理论上较优越, 有广阔的发展远景。

2.2.1 线性规划(LP)静态模型

由于 LP 较之其他优化技术更为成熟, 因此在 LRTP 中首先考虑的是 LP。尽管有些问题的本身可能是非线性的, 但也常把非线性问题线性化, 再使用 LP 技术。

i) Kaltenbach 模型^[8]

1970 年, Kaltenbach 最早提出一种 LRTP 的 LP 模型, 这个模型的数学表达式如下:

$$\text{Minimize } \Delta c = \sum_{m=1}^r c_m \Delta r_m \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \left| \psi_k^* + \sum_{m=1}^r \frac{\partial \psi_k}{\partial r_m} \Delta r_m \right| \leq \bar{\psi}_k \quad k=1, 2, \dots, r \quad (2)$$

$$\Delta r_m \geq q_m \quad m=1, 2, \dots, r \quad (3)$$

其中 r = 系统支路数;
 c_m = 与追加第 m 条支路导纳 Δr_m 相应的投资;

Δr_m = 第 m 条支路追加的导纳;

$\bar{\psi}_k$ = 第 k 条支路两端母线最大允许相角差;

ψ_k^* = 正常或单线停运时 k 支路两端母线的最大实际相角差;

q_m = 支路 m 导纳变化下界。

由(2)式可知, 系统采用 dc 潮流模型。这里相角差函数 $\psi = \phi(r)$ 对支路导纳 r 的泰勒展开式一次项系数 $\frac{\partial \phi}{\partial r}$, 也就是用灵敏度矩阵来近

似模拟各种停运情况下的系统安全性约束。

设规划过程已进行到阶段 t , 并得到网络 $Net(t)$, 图 2 给出了完整的 Kaltenbach 模型。该模型概念清晰, 几乎可以直接调用通用 LP 程序包, 因此后面将多次被引用。

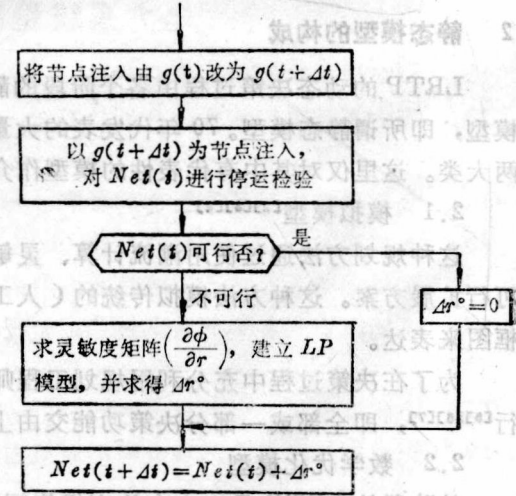


图 2 Kaltenbach 模型

ii) Garver 模型^[9]
Garver 在 1970 年发表了以线性潮流估计为基础的 LP 模型, 通过引入“过负荷支路”的概念, 把网络上的线路追加问题转化成为传输网流问题。传输网络由两类弧组成: ①线路弧, 对应于原网络中的输电元件, 弧容量即该元件的额定容量; ②过负荷弧, 对应于允许扩展的线路走廊, 没有容量限制。进一步假设,

弧的传输费用与其长度成正比，因此可直接采用弧的长度作为费用函数（指数）。对过负荷弧，其费用函数应满足两个要求：

- (a) 能反映新线路造价的相对大小；
- (b) 应足够大，使得尽可能首先充分利用线路弧。

这样，传输网络上的流是按最短路径分配的。Garver 以此作为线性潮流估计，其 LP 模型为

$$\text{Minimize } \sum_{i \in \text{所有过负荷弧}} c_i f_i \quad (1)$$

s. t. 网络节点流守恒

$$\text{系统功率平衡 } \sum P_G = \sum P_L \quad (2)$$

弧容量约束

其中 c_i 为过负荷的费用函数， f_i 为过负荷弧流。这种线性潮流估计既指出了网络是否过负荷，又提供了新线路追加的指导性信息。

Garver 模型的另一部分是对 LP 的连续解取整，作者没有应用分枝定界法，而是采用“最大过负荷原则”进行取整，完整的模型实际上是两个部分。

Villasana 等人对 Garver 模型作了不同的处理^[10]，他们以 dc 潮流方程作为系统模型：

$$\text{Minimize } [C_D] [P_D] \quad (1)$$

$$\text{s. t. } [P_G] - [B][\theta] + [K]' [P_D] = [P_A] \quad (2)$$

$$P_\alpha \leq P_\alpha^{\max} \quad \alpha \in \text{系统支路集} \quad (3)$$

求解时可调用 LP 程序包。

iii) Dodu 模型^[11]

这个模型发表于 1978 年，作者认为 LRTP 是离散时间最佳控制问题。该规划周期分为 l 个阶段，控制矢量为每阶段投产的传输容量，第 t 阶段的 LRTP 问题可描述为，给定系统 $x(t-1)$ ，欲求得一组控制矢量，使得系统扩展为 $x(t)$ 在满足：

$$\text{① 连续性约束； } x(t) \geq x(t-1) \quad t=1, 2, \dots, l;$$

$$\text{② 扩展上界约束 } x(l) \leq \bar{x}$$

使某个适当定义的经济函数达到最小。

作者应用传输网络模型及网络流算法来模拟真实系统的运行状况，有其独到之处，但是大量调用网流算法无疑是个很沉重的计算负担。

iv) Adams 模型^[12]

Adams 采用 dc 潮流作系统模型，用节点注入法模拟输电元件的追加和移去，从而把静态的 LRTP 问题构成标准的 LP 表，包括：

① 系统模型；

② 线路停运模型；

③ 追加线路模拟。

由于要对每种停运以及每种可能的线路追加进行模拟，并包括在 LP 表中，表的维数将大大超出前三种 LRTP 模型。

2.2.2 非线性规划(NLP)静态模型

这里专指梯度法模型^[13]。作者采用性能指标 PI 作为目标函数，直流潮流模型作为系统模型，这样 LRTP 静态问题成为非线性优化问题：

$$\text{Minimize } PI = \sum_{l=1}^L \frac{\omega_l}{2n} (P_l/\bar{P}_l)^{2n} + K_l B_l$$

s. t.

$$P_{NETi} = \sum_{j=1}^N B_{ij}(\delta_i - \delta_j)$$

$$B_i^m < B < B_i^M$$

其中 ω_l 为线路 l 的非负权系数, B_l 为其导纳, K_l 为沿走廊 l 追加线路的单位投资。

性能指标 PI 中包含的前一项是过负荷罚项, 后一项是新线路投资项。如此定义性能指标是要在两者之间取得折衷。

作者采用梯度搜索法解这个极小值问题, α 为搜索步长, 有

$$B^{(r+1)} = B^{(r)} - \alpha \nabla_{B^{(r)}} PI$$

求得改进系统 $B^{(r+1)}$ 为止, 这是规划的第 I 阶段。第 II 阶段对生成的新系统作安全性检验, 当发现系统不充分时再进行循环。

1984 年, Ekwue 等人在这个模型中加入移相变压器的处理以及在第 II 阶段中采用概率指标作为安全性检查^[14]。

2.2.3 整数规划(IP)静态模型

LRTP 是个离散性整数优化问题。如果考虑到与潮流相关的运行费用, LRTP 又是个混合整数规划问题(MIP), 下面分别加以介绍。

i) Adams 模型^[15]

Adams 认为对传输网络中的每一条弧, 其费用函数可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} Z &= f + ex & x > 0 \\ Z &= 0 & x = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 f 为弧固定投资, x 为弧流, e 为与流 x 相应的运行费。

引入 0-1 变量 δ , 那么, Z 函数又可写成

$$\left. \begin{aligned} Z &= f\delta + ex \\ \text{以及 } 0 &\leq M\delta - x \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

M 为弧的容量, 式(2)为混合整数规划形式。

Adams 分两步推出费用函数。第 I 步只计入固定投资, 第 II 步, 计入运行费(铜耗)。

ii) Hicks 模型^[16]

这个整数规划(ILP)模型有以下特点;

- ① 采用 dc 潮流方程作为系统模型;
- ② 采用灵敏度分析对扩展支路作预筛选;
- ③ 提出费用-容量曲线的概念, 模拟不同类型线路的组合。

从整体来看, Hicks 模型与一般模拟法的区别仅在于用 ILP 优化技术代替扩展方案的启发式生成, 这恐怕是最优技术最简单的应用方式了。

iii) Sjelogren 模型^[17]

这个模型是对 Hicks 模型的推广, 作者应用费用-容量曲线的概念构造 0-1 二次规划模型, 在目标函数中纳入运行费用, 采用二阶灵敏度分析处理安全约束等问题。

iv) MINLP 模型^[18]

这个模型和 Adams 的 ILP 模型很相似^[15]。所不同的是, 这里的模型是非线性的, 且采

用最大流算法求解松弛问题的可行解。

3 动态模型的构成

如前所述, L RTP 是个涉及未来几十年系统发展的多阶段有约束优化问题, 这意味着应该采用动态模型来模拟问题的动态特性。目前的作法是依照某种思想将静态模型综合起来, 构成规划周期上的总体模型。

3.1 模拟模型

这种模型是模拟规划工程师的传统规划过程, 这个过程可用以下流程图来表示:

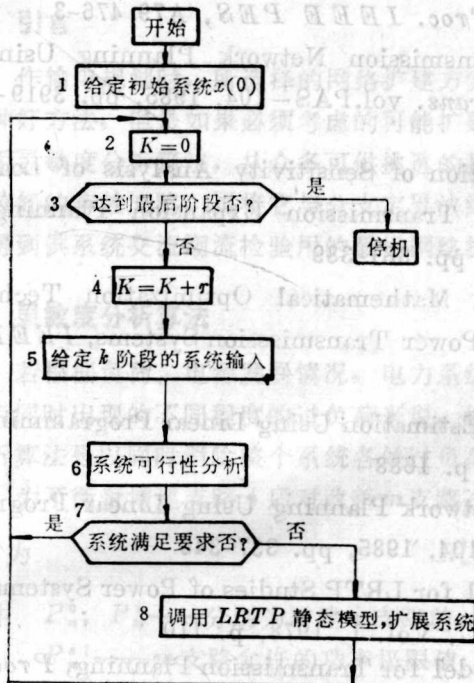


图 3 模拟模型框图

第 8 框中的静态模型, 可以是前面介绍过的模拟静态模型, 也可以是其他各种规划模型。

3.2 数学优化动态模型

上述模拟模型的优化特性太粗糙, 实际上是静态模型的简单串联, 难以保证全局优化。而数学优化模型通过对整个决策空间的系统搜索, 从理论上保证解的最优性。

3.2.1 Meliopoulos 模型^[18]

设 规划阶段数为 NP

$$\text{系统差分方程 } x(k+1) = x(k) + U(k) \quad (1)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, NP-1$$

$$\text{可行性约束 } U \in U[x(k), k+1] \quad (2)$$

$$x \in x[x(k-1), U(k-1), k] \quad (3)$$

$$\text{初始条件 } x(0) = c \quad (4)$$

$$\text{性能指标; } J = \sum_{k=0}^{NP-1} \{ \lambda(k) l_1 U(k) + \beta(k) l_2 [x(k+1), k+1] \} \quad (5)$$

其中 $\lambda(k), \beta(k)$ 为资金折现函数。

现求最优控制序列: $U(0), U(1), \dots, U(NP-1)$, 使得性能指标 J 在条件(1)-(4)制约下达到最小。

3.2.2 Dusondhef 动态规划模型^[19]

作者将 L RTP 问题看成是有限马尔可夫连续决策过程, 整个模型是由: ① DP 的确定性搜索过程; ② 概率性搜索过程; ③ 启发式搜索终止判据三部分组成, 详情参看原文。

应当指出几点:

① 作者试图尽力减小 DP 搜索空间, 把完整的解空间划分成一组子空间, 然后在子空间里采用 DP 确定性搜索, 当然有可能出现最优解被剖分掉的情形。

② 该模型本身并不生成扩展方案, 仅仅对给定的扩展方案进行搜索以生成扩展序列, 因此该模型只能用于规划的综合阶段。

参 考 文 献

[1] EPRI RePort, Long-Range Transmission Expansion Models, EPRI EL

- [2] F. Albuyeh, et al.: A Transmission Network Planning Method for Comparative Studies, *Proc. IEEE SM.*, 606-4, 1980
- [3] Clouis C. Gonzaga, et al.: Short-Term Expansion of Electric Power Transmission Systems, *Proc. 6th P_{SCC}*, 1978
- [4] R. J. Benoon, et al.: Use of Sensitivity Analysis in Automated Transmission Planning, *IEEE Trans.* Vol. PAS-101, 1982, pp. 53-59
- [5] C. Dechamps, et al.: TRANEX, An Interactive Computer Program for Transmission Expansion Planning, *Proc. IEEE PES*, A79 476-3
- [6] A. Montielli et al.: Interactive Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion, *IEEE Trans.* vol. PAS-104, 1985, pp. 3919-3925
- [7] Mario, V.F. Pereira, et al.: Application of Sensitivity Analysis of Load Supplying Capability to Interactive Transmission Expansion Planning, *IEEE Trans.* Vol. PAS-104, 1985, pp. 381-389
- [8] J.C. Kaltenbach & E.H. Gehrig: A Mathematical Optimization Technique for the Expansion of Electric Power Transmission Systems, *IEEE Trans.* Vol. PAS-89, 1970, p. 113
- [9] L.L. Garver: Transmission Network Estimation Using Linear Programming, *IEEE Trans.*, Vol. PAS-89, 1970, p. 1688
- [10] R. Villasana, et al.: Transmission Network Planning Using Linear Programming, *IEEE Trans.* Vol. PAS-104, 1985, pp. 337-348
- [11] J.C. Dodu, et al.: A Dynamic Model for LRTP Studies of Power Systems, the ORTIE Model, *Proc. 6th P_{SCC}*, Vol. 1, 1978, p. 110
- [12] R.N. Adams, et al.: General LP Model for Transmission Planning, *Proc. 7th P_{SCC}*, 1981, pp. 56-60
- [13] W.R. Puntel, et al.: An Automated Method for Long-Range Planning of Transmission Networks, *Proc. 8th P_{ICA}*, 1973, pp. 38-46
- [14] A.O. Ekwue, et al.: Transmission System Expansion Planning by Interactive Methods, *IEEE Trans.* Vol. PAS-103, 1984, pp. 1583-1591
- [15] R.N. Adams, et al.: Optimal Planning of Power Networks Using Mixed-Integer Programming, Part I: Static Time-phased Network Synthesis, *Proc. IEE*, Vol. 121, No. 2, 1974, pp. 139-147
- [16] Kenneth L. Hicks, et al.: Transmission Expansion by Branch-and-Bound Integer Programming With Optimal Cost-Capacity Curves, *IEEE Trans.* Vol. PAS-93, 1974, pp. 1390-1400
- [17] Denis, V. Sjelogren, et al.: Nonlinear Integer Programming for Transmission Expansion Planning, *Proc. IEEE PES WM. Paper*, A77 150-6
- [18] A.P. Meliopoulos, et al.: Optimal LRTP With AC Power Flow, *IEEE Trans.* Vol. PAS-101, 1982, p. 4156
- [19] Y.P. Dusondhet, et al.: Transmission Planning Using Discrete Dynamic Optimizing, *IEEE Trans.* Vol. PAS-92, 1973, pp. 1358-1371

输电规划

一种灵敏度分析与分枝定界法结合使用的方法

周 勤 慧

(华中工学院)

0 引言

作输电规划时,所选择的网络扩建方案必须为整数。分枝定界法是寻求最优整数解答的一种好方法,但是如果必须考虑的可能扩建的支路数很多时,计算工作量将非常之大。因此采用灵敏度分析算法,从众多可供挑选的扩建支路中,筛选出对缓和整个系统过负荷经济效益较好的有效支路,再将它与分支定界法结合应用,就可以只检查可行的整数组组合的一部分,而得到供系统交流潮流检验用的最优网络扩建方案。

1 灵敏度分析算法

若根据负荷、电源发展情况,电力系统将在某些支路出现过负荷,则从缓和系统中不同地点同时出现的不同程度的过负荷来说,增建不同支路的效果及其投资是不同的。本灵敏度分析算法是以同时消除整个系统各处过负荷为目的。

为了衡量增建支路 i 后对改善 m 支路过负荷的作用,定义支路 i 对支路 m 的灵敏度系数

$$R_m^i \text{ 为 } R_m^i \triangleq \frac{P_m^0 - P_m^i}{P_m^{a_i}} \quad (1)$$

式中 P_m^0, P_m^i ——分别为增建 i 支路前、后, m 支路的功率值;

$P_m^{a_i}$ —— m 支路允许的功率极限值。

由此定义可以看出, R_m^i 的数值能够表征增建 i 支路后对缓和 m 支路过负荷的作用。

若增建一条 m 支路的投资为 C_m , 其允许功率值为 $P_m^{a_i}$, 则 m 支路单位功率的投资为 $\frac{C_m}{P_m^{a_i}}$ 。若增建支路 i 后,使 m 支路的功率减少了 $(P_m^0 - P_m^i)$, 那么增建 i 支路后给 m 支路带来的经济效益为 $(P_m^0 - P_m^i) \cdot (C_m / P_m^{a_i})$ 。此经济效益是在 i 支路处投资了 C_i 后在 m 处获得的。我们把增建 i 支路的单位投资使 m 支路获得的经济效益称为相对效益系数 K_m^i , 即

$$K_m^i = \frac{(P_m^0 - P_m^i) \cdot \frac{C_m}{P_m^{a_i}}}{C_i} = \frac{(P_m^0 - P_m^i)}{P_m^{a_i}} \cdot \frac{C_m}{C_i} = R_m^i \cdot \frac{C_m}{C_i} \quad (2)$$

可以看出,由(2)式定义的 K_m^i 有明确的物理意义。

计算增建 i 支路对整个系统的综合经济效益时,必须考虑增建 i 支路的前后,所研究的 m 支路是否会出现过负荷。我们用 $SR(i)$ 表示增建 i 支路后对整个系统的综合经济效益,

$$SR(i) \text{ 定义为 } SR(i) \triangleq \sum_{m=1}^M SQ_m^i \quad (3)$$

其中 M ——需要检验该处功率是否满足要求的支路数。

$$SQ_m^i \triangleq \begin{cases} (K_m^i)^2 = \left(\frac{P_m^0 - P_m^i}{P_m^{a_i}} \cdot \frac{C_m}{C_i} \right)^2, & \text{当 } P_m^{a_i} < P_m^i < P_m^0 \\ \left(\frac{P_m^0 - P_m^{a_i}}{P_m^{a_i}} \cdot \frac{C_m}{C_i} \right)^2, & \text{当 } P_m^0 > P_m^{a_i} \geq P_m^i \\ -(K_m^i)^2 = - \left(\frac{P_m^0 - P_m^i}{P_m^{a_i}} \cdot \frac{C_m}{C_i} \right)^2, & \text{当 } P_m^i \geq P_m^0 > P_m^{a_i} \\ -(K_m^i)^2 = - \left(\frac{P_m^0 - P_m^i}{P_m^{a_i}} \cdot \frac{C_m}{C_i} \right)^2, & \text{当 } P_m^i > P_m^{a_i} \geq P_m^0 \\ 0 & \text{当 } P_m^0 \leq P_m^{a_i}, P_m^i \leq P_m^{a_i} \end{cases} \quad (4)$$

因此,比较 $SR(i)$ 的符号及数值($i=1, \dots, L, L=$ 可供选择的扩建支路数),就能看出扩建不同支路后系统所获得的综合经济效益的差异。

为了筛选出对系统综合经济效益的较好的支路,可以检验是否满足:

$$\frac{SR(i)}{SR_{\max}} > S_{\text{cut}} \quad (5)$$

式中 $SR_{\max} = \max\{SR(1), SR(2), \dots, SR(L)\}$;

S_{cut} ——筛选系数,其值为小于1的正数,建议取0.3—0.5;

L ——可供选择的支路数。

满足不等式(5)的待选支路,就是灵敏度分析模型输出的有效的待选支路。

当输电网作单一故障安全检查时,不同独立回路停役,可能会在系统中不同支路引起不同程度的过负荷。因此研究支路 i 扩建后的效果时,应该考虑到扩建支路 i 将在系统中各个独立回路停役时都起作用。扩建支路 i 的综合效果可用下式计算:

$$SR(i) \triangleq \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{M_t} S_t Q_m^i = \sum_{t=1}^T S_t R(i) \quad (6)$$

式中 T ——作单一故障安全检查时,需依次切断的独立回路的数目;

M_t ——切断第 t 条独立回路时,需要检验该处功率是否满足要求的数目;

$S_t Q_m^i$ ——切断第 t 条独立回路时,按(4)式计算的扩建 i 支路后对 m 支路功率的影响;

$S_t R(i)$ ——切断第 t 条独立回路时,扩建 i 支路的综合效果。

此后,仍按(5)式选择出有效的待选支路。

在电力系统规划设计阶段,以上计算可以利用直流模型来进行。

2 分枝定界法与灵敏度分析算法结合应用

用分枝定界法和灵敏度分析算法相结合来求解输电网扩展问题可归纳为:在满足正常及事故后均不过负荷,且扩建回路数为整数等约束条件下,求总扩建费为最小值时的方案。

现用图1所示分枝定界法举例说明其计算过程:假设在扩建支路前,系统中某些支路将出现过负荷,因此必须扩建网络。先将代表最优方案的投资 C_{op} 预先置一个很大的数值。

第1步:扩建支路 a ,由于 $C_a < C_{op}$,故检验约束条件是否满足。经计算,约束条件均满足,故令 $C_{op} = C_a$ 。此 $C_{op}(=C_a)$ 值是迄今在所有满足约束条件的方案中,最小的扩建投资费。它确定了一个上界,且表明满足约束条件的最优方案,其目标函数不会超过此 $C_{op}(=C_a)$ 值。

第2步:扩建支路 b ,其投资 C_b 是第3框的一个下界,它说明如果由于约束条件不能满足而必须继续扩建支路的话,那末此后所得到的任何方案其总投资必大于此 C_b 值。由于 $C_b > C_{op}$,

即下界比上界大，因此不必再检验是否满足约束条件，也不必从第3框继续往下分枝。

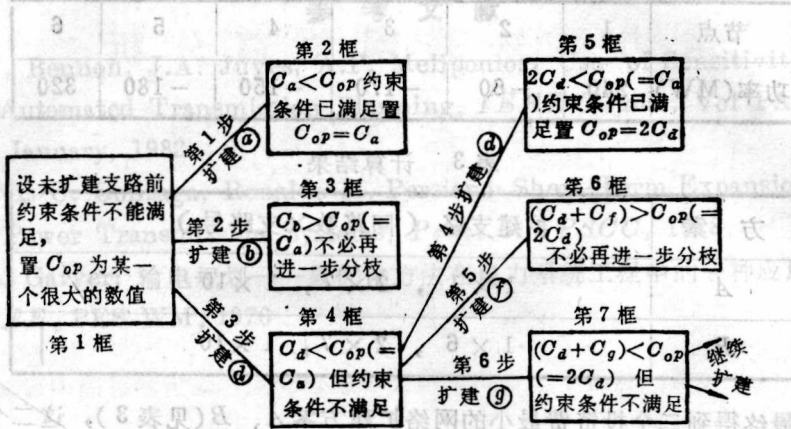


图1 分枝定界法举例

第3步：扩建支路 d ，由于 $C_d < C_{op}(=C_a)$ ，又因约束条件未能满足，故必须再扩建支路。

第4步：再扩建支路 d 。由于 $(C_d + C_d) < C_{op}(=C_a)$ ，且约束条件均已满足。故令 $C_{op} = 2C_d$ 作为新的最小费用。

第5步：从第4框再扩建支路 f ，则总投资为 $C_d + C_f$ 。由于 $(C_d + C_f) > C_{op}(=2C_d)$ ，故不必再校验约束条件。回到原始状态即第4框。

第6步：从第4框再扩建 g ，总投资为 $C_d + C_g$ 。由于 $(C_d + C_g) < C_{op}(=2C_d)$ ，又约束条件不满足，因此必须继续往前搜索。

最后可以找到 C_{op} 为最小值时的网络扩建方案。

在图1中，各框在不满足约束条件时所提出的若干条有效的扩建支路，是由灵敏度分析模型提供的。

3 算例

设有一个六结点系统（见表1和表2），要求提出一个投资最小且不出现过负电荷的网络扩建方案。

表1 已建线及允许扩建线的路径

路径	支路两端 结点	长度 (km)	线路功率 限制 (MW)	已建回 路数	路径	支路两端 结点	长度 (km)	线路功率 限制 (MW)	已建回 路数
1	1—2	40	100	1	9	3—6	60	80	0
2	2—3	20	100	1	10	5—6	45	100	0
3	3—4	30	100	1	11	3—5	35	100	0
4	1—5	38	100	1	12	2—4	48	100	0
5	4—5	40	100	1	13	2—5	50	100	0
6	1—3	40	100	1	14	1—6	68	70	0
7	4—6	38	100	2	15	2—6	68	70	0
8	1—4	68	70	0					

表2 节点净注入功率

节点	1	2	3	4	5	6
功率(MW)	240	-60	-170	-150	-180	320

表3 计算结果

方案	扩建支路 (回路数×支路号)
A	1×1, 2×7, 1×10
B	1×6, 2×7, 1×10

经计算, 最终得到二个投资费最小的网络扩建方案A、B(见表3), 这二个方案可供规划人员根据某些未被计入的条件, 进一步分析选取。

对本算例, 我们在 WICAT-150 微型计算机上分别计算了 S_{cut} 为 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.85 等各种情况。各次计算结果都与表3完全一致, 但所化费的时间却相差悬殊:

$S_{cut}=0.85$ 时的计算时间为 $S_{cut}=0.0$ 时的 1.67%

$S_{cut}=0.5$ 时的计算时间为 $S_{cut}=0.0$ 时的 9.17%

$S_{cut}=0.3$ 时的计算时间为 $S_{cut}=0.0$ 时的 14.28%

$S_{cut}=0.1$ 时的计算时间为 $S_{cut}=0.0$ 时的 23.3%

当 S_{cut} 值减小时, 满足 $SR(i) > S_{cut} \cdot SR_{max}$ 的支路数增多, 被筛选掉的支路减少, 致使计算时间大大增加。当 $S_{cut}=0.0$ 时, 实际上仅删除了无综合经济效益 ($SR(i)=0.0$) 及综合经济效益为负值 ($SR(i) < 0.0$) 的支路, 所以按 $S_{cut}=0.0$ 进行计算, 即费时又无必要。如果 S_{cut} 值取得太大, 计算时间虽然大大缩短, 但有可能将最优方案筛选掉。 S_{cut} 最适当的值应取多大, 严格的数学分析, 理论上的论证是极其复杂困难的。但是从物理上分析不难得知, 只要 S_{cut} 足够小, 那么由灵敏度分析模型所得到的有效支路中必包括构成最优方案的支路。我们曾对大量算例作过计算分析, 计算结果表明, 当 S_{cut} 取为 (0.75—0.9) 时, 筛选结果所得到的最优方案与 $S_{cut}=0.1$ 时所得到的最优方案完全一致。这也就是说, 在这些算例中, 只要取 $S_{cut} \leq 0.75$, 就不会筛选掉 $S_{cut}=0.1$ 时所对应的最优方案。由于 $S_{cut}=0.1$ 时, 只筛选掉了综合经济效益极小的支路, 而将一切稍有效益的支路都保留了下来, 故可认为它也就是系统的最优方案。在一般情况下, 考虑计入一个安全系数, 建议采用 $S_{cut}=0.3—0.5$ 作为筛选准则。

4 结论

①在输电规划中, 将分枝定界法与本文提出的灵敏度分析算法结合使用, 可以仅在输电线路一部分可行整数组合中寻求最优解。

②利用本灵敏度分析算法, 可以在正常运行及线路停役情况下, 用以检验扩建不同输电线路对缓和各种过负荷情况的综合效果。

