

[电力设备]

基于GAMS多阶段电源规划的综合优化

文/南京工程学院 李超杰 谢宗宸 石子敬 吴宗展 叶宇成 陈光宇

基于满足规划年限内的电力需求及电力系统技术性指标的要求，分别利用线性规划、整数规划和混合整数非线性规划等相关知识建立数学模型，通过分支定界法、Benders分解等算法优化模型，并运用GAMS等仿真软件进行综合优化求解，来确定不同阶段电力设备增装的时间和类型等，以使电力系统扩展规划的总费用最小。

电源规划是关系电力系统电源布局的战略决策，是电力系统规划的核心部分，其所要解决的核心问题在于在何处、于何时、建何种类型以及容量多大的电厂，是涉及电力工程可靠性、科学性和经济性的根本问题。

电源规划的目的是以某一时期的负荷预测为根据，在满足一定可靠性的前提下找到一种最经济的电源开发方案，用以确定何时、何地投入和建设何种规模、何种类型的发电机组。电源规划问题是一种非凸的、高维数、非线性的和离散的优化问题，理论上很难找到最优解。

GAMS (The General Algebraic Modeling System) 是一款数学规划和优化的高级建模系统，常用于最优化的计算机数值分析，它具有简单清楚的使用者接口和强健稳定的数值分析能力，计算效率高，结果好，运用广泛。GAMS 可以高效求解线性规划问题 (LP)、非线性规划问题 (NLP)、混合整数线性或非非线性规划问题 (MIP、MINLP)。

电源规划本质上是一个多阶段数学优化问题，常通过线性规划、非线性规划和启发式优化方法等进行求解。

本文在电力系统规划、不确定能源随机接入和有功-无功经济调度研究的基础上，根据它们

的特点，在GAMS上建模并编写程序进行优化计算，目的是同时减小线路网损和发电成本。

多阶段优化模型

本文考虑的目标函数含有投资成本、运行成本及停电损失成本三个阶段。本文模型准确度主要体现在考虑成本的等年值转化及停电损失费用考虑到7阶系统故障状态的影响，因此模型准确度较高。同时本节还将介绍本文的约束条件，为下节的算例分析建立完整的数学模型。

1. 目标函数

在实际电源规划中，考虑成本的等年值转化等问题，以计及投资成本、运行成本和停电损失成本的总成本最小为目标，建立多阶段电源规划部的综合优化模型。

$$C = \min C_1 + C_2 + C_3 \quad (1)$$

式中， C_1 是投资成本； C_2 是运行成本； C_3 是停电损失成本。

(1) 投资成本最小

发电机寿命为30年，即投资成本中等年值中 N 取30；规划年数为10年，即运行成本中等年值中 N 为10。设投资成本等均折算到2019年。

目标函数中投资成本 C_1 为

$$C_1 = \sum_{k=1}^{11} \sum_{j=1}^{32+N} \frac{n_j^k s_j}{(1+r)^k} \times \frac{r(1+r)^{10}}{r(1+r)^{10}-1} \quad (2)$$

式中, k 是相对于2019年的年份; n_j^k 是第 k 年新增机组类型 j 的数量。

(2) 运行成本最小

$$C_2 = \sum_{k=1}^{11} \sum_{i=1}^{32+N} \sum_{t=1}^1 \left(\frac{a_i p_{i,t}^{k2} + b_i p_{i,t}^k c_i}{(1+r)^k} \right) \frac{r(1+r)^{30}}{r(1+r)^{30}-1} \quad (3)$$

式中, N 是新增机组总数 $N = \sum_{j=1}^4 n_j$ 。

(3) 停电损失成本最小

$$C_3 = 365 \sum_{t=1}^{24} \sum_{q=1}^{qt} \left(\prod_{i=1}^{qt} p_{ngi} \times \prod_{i=1}^{qt} R_i \right) \quad (4)$$

2. 约束条件

(1) 功率平衡约束

电力系统必须保持发电和用电功率平衡, 功率平衡是系统电压和频率保持稳定的基础。一旦功率失去平衡, 系统的电压和频率就会出现偏差。为了满足系统安全稳定运行要求, 必须设立功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{32+M} U_{i,t}^k P_{i,t}^k = P_{LN}^k p_{L,t}^* \quad (5)$$

其中

$$P_{LN}^k = 2805(1+3\%)^k \times 1.2 + 400 \quad (6)$$

即为第 k 年的负荷峰值; 其中

$$M = \sum_{k=1}^4 \sum_{j=1}^4 n_j^k \quad (7)$$

n 是前 k 年新增机组数。

(2) 每年新增投运机组约束

考虑生产实际情况, 本文中新增规划机组备用并非理想化, 需考虑每年机组供应的有限性以及总装机台数的有限性, 因此建立每年新增投运机组相关约束。

$$\underline{M_j} \leq n_j^k \leq \overline{M_j} \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^{11} n_j^k \leq \overline{M_j} \quad \text{对} \forall k \text{均成立} \quad (9)$$

(3) 机组出力极限约束

由于电力系统需要保证供电可靠性、稳定性, 原有机组以及新增机组单台出力拥有极限。

$$\underline{p_i} \leq p_{i,t}^k \leq \overline{p_i} \quad \text{对} \forall t, k \text{均成立} \quad (10)$$

基于Benders分解的模型优化策略

对于此种大型混合整数规划问题, 可采用Benders分解将其划分成主、子问题。

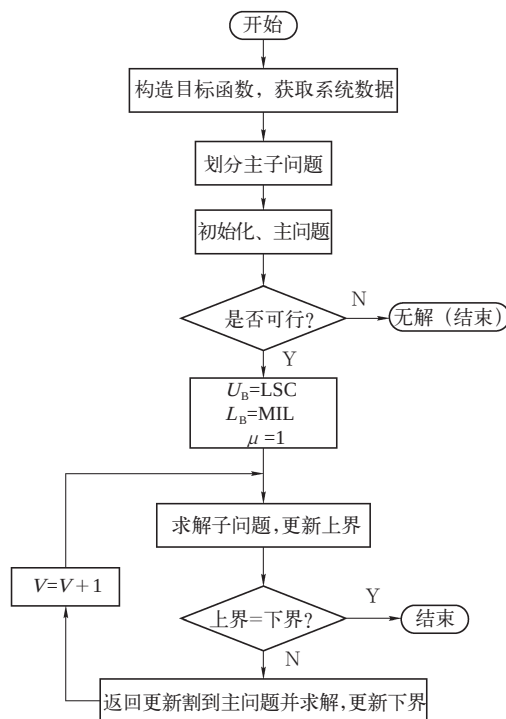


图1 Benders分解法基本流程图

本文基于Benders分解的模型优化策略, 将原多阶段电源规划的复杂混合证书非线性问题分解主、子问题。主问题为只包含整数和Benders割的整数规划问题, 较容易求解。求解上层主问题后, 可将解带入到下层子问题中, 当整型变量均确定后, 子问题变成只含有连续性变量的非线性规划问题, 经反复迭代, 求出相应结果。

(1) 划分后的主问题

$$C = \min C_1 + C_2 + C_3 + \alpha \quad (11)$$

式中, α 是新增的割。包括的约束为新增机组台数约束以及Benders割约束。

(2) 划分后的子问题

$\min \alpha$ 约束条件为功率平衡约束和机组出力上下限约束。

算例分析

1. 算例简介

本文基于2019年中国电机工程学会杯电源规划问题数据, 考虑IEEE-RTS多阶段电源扩展规划问题, 以2019年为基准年, 假设2020—2030年, 年峰值负荷增长率均为3%。每年每天的负荷标么值同典型日负荷。

并且, 在停电损失计算中尽可能考虑高阶(大于3阶)系统故障状态的影响, 规划未来10年每年增装机组的类型和数量。

表1 IEEE-RTS系统已有发电机参数

机组类型	机组台数	机组容量 /MW	最小机组 出力/MW	发电成本系数 a /(\$/MW ²)	发电成本系 b /(\$/MW)	发电成本 系数 c /	最小出力时边 际发电成本 /(\$/MW·h)	满发时边际发 电成本 /(\$/MW·h)
1	4	20	10	0.064	48	401	49.28	50.56
2	4	76	15.2	0.014	43	212	43.425 6	45.128
3	3	100	40	0.053	42	781	46.24	52.6
4	3	197	69	0.007	40	832	40.966	42.758
5	5	12	4	0.328	37	86	39.624	44.872
6	4	155	54.3	0.008	44	382	44.868 8	46.48
7	2	400	150	0.001	35	595	35.3	35.8
8*	6	50	20	0.023	41	284	41.92	43.3
9	1	350	140	0.005	36	665	37.4	39.5

表2 IEEE-RTS系统待建发电机参数

机 组 类 型	投资 成本 / $\times 10^6$ \$	机组 容量 /MW	最小机组 出力 /MW	发电成本 系数 a (\$/MW)	发电成本 系数 b (\$/MW)	发电成本 系数 c /	最小出力时边 际发电成本 /(\$/MW·h)	满发时边际 发电成本 /(\$/MW·h)	年最大投 运台数 /台	总装机台 数上限 /台	使用 寿命 /年	贴 现 率 (%)
1	220	250	100	0.008	34	600	35.6	38.4	1	3	30	8
2	90	100	40	0.042	43	350	46.36	50.7	2	6	30	
3	60	65	25	0.054	38	250	40.7	45.356 153 8	3	10	30	
4	50	50	15	0.217	33	200	39.51	47.85	2	10	30	

2. 算例计算

本文通过Benders分解将原有多阶段复杂问题分解为可单独计算的主、子问题，然后

借助GAMS仿真软件进行计算，以2019年为基准年，规划未来10年每一年增装机组的类型和数量。

表3 未来10年每一年增装机组的类型和数量

年份		2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
类型1	增设数量/台	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
类型2	增设数量/台	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1
类型3	增设数量/台	2	0	1	0	1	2	1	2	0	1	0
类型4	增设数量/台	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1

结束语

本文基于满足规划年限内的电力需求及电力系统技术性指标的要求建立多阶段电源规划的混合整数非线性数学模型，具有较强的适用性，在提高电力系统规划的经济效益等方面具有积极作用。同时，本文运用分支定界法、Benders分解

法等多种数学算法，以迭代、分层次处理等思想对原有模型进行一定优化，提高了多阶段电源规划问题的鲁棒性。在算例求解方面，本文运用GAMS等现代仿真工具混合求解，提高了求解问题的效率和准确度，支持高维度问题的求解，具有现实意义。EA