

② 6-10

一种电源扩展动态规划模型与算法

A Dynamic Model for Generation Expansion Planning and Algorithm

杨秀苔
Yang Xiutai
(重庆大学)

聂端
Nie Duan
(重庆电业局)

TM711

摘 要 对电源长期扩展规划进行了探讨,建立了电源长期扩展动态规划模型,提出了解算该模型的方法——两步规划法,并对例样系统进行了优化试算。

关键词 动态规划; 电源规划; 算法

中国图书资料分类法分类号 TM711

ABSTRACT This paper discusses the problem of long-range generation expansion planning. A dynamic model for long-range expansion planning is set up and an algorithm—a two-step programming is presented, which is used here in a case.

KEYWORDS dynamic programming; generation expansion planning; algorithm

0 概 述

电源规划是电力工业必不可少的前期工作,它主要是根据电力负荷增长情况,综合平衡有关的条件和因素,考虑系统中各类电厂技术上和经济上的互相配合,在某一可靠性水平上,决策在哪一年、哪一地点新增机组的类型及容量大小,经济地满足各类负荷的需求。对这个问题的研究国内始于80年代。国内外的电源规划软件包大都采用了分解协调技术,将电源规划问题分解为电源投资决策和生产模拟两部分。电源投资决策部分主要考虑解决高维数的整数决策变量的优化问题。本文就电源长期扩展规划投资决策模型的建立及解算方法进行了探讨。

1 电源长期扩展投资决策模型的建立

电源长期扩展规划实际上是一个多级投资决策过程,考虑到装机时间与装机容量的离散性,特建立投资决策动态规划模型。

首先选择在役机组 x 为系统状态向量,规划拟新增机组 u 为控制向量。如果给定第 k 阶段状态向量 $u(k)$ 的值,则该阶段决策向量 $u(k)$ 一经确定,第 $k+1$ 阶段状态向量 $x(k+1)$ 的值也就完全确定。对于电源规划这一特定问题而言,阶段状态向量 $x(k)$ 和阶段控制向量

$u(k)$ 之间有如下关系：

$$x(k+1) = x(k) + u(k) \quad (1)$$

若 $x(k)$ 、 $u(k)$ 分别为第 k 阶段的可行状态集和可行控制集，则第 k 阶段的第 i 种状态和第 j 种决策 $u_j(k)$ 必须满足以下条件：

$$x_i(k) \in x(k) \quad u_j(k) \in u(k) \quad (2)$$

若 L 为单一阶段的费用，则费用函数方程可表示为：

$$F = \sum_{k=1}^N L[x(k), u(k), k] \quad (3)$$

且
$$L(x, u, k) = \frac{1}{(1+i_s)^{k \times d}} \{C[u(k)] + O[x(k)]\} - R[u(k)] \quad (4)$$

设 $g[x_i(k)]$ 为从规划期初到第 k 阶段 i 状态的费用现值，那么，可得计算方程：

$$g[x_i(k+1)] = \min_{u(k)} \{g[x_i(k)] + L[x_i(k), u(k), k]\} \quad (5)$$

对于任一状态 $x_i(k)$ 必须满足系统可靠性约束：

$$\text{LOLP}[x_i(k)] \leq \lambda \quad (6)$$

以上方程各参数意义如下：

$C[u(k)]$ ——决策 $u(k)$ 所需投资，单位：亿元；

$O[x(k)]$ ——状态 $x(k)$ 在本阶段的运行费，单位：亿元；

$R[u(k)]$ ——决策 $U(k)$ 在计算期末的折余值，单位：亿元；

$\text{LOLP}[x_i(k)]$ ——状态 $x_i(k)$ 下系统电力不足概率；

λ ——系统电力不足概率上限；

d ——每一阶段长度，单位：年；

k ——阶段变量；

N ——阶段总数，且 $N \cdot d = T$ 为规划期；

i_s ——贴现因子(或利率)。

方程(5)是动态规划形式的基本计算方程，它描述了电力系统最小投资，运行费用是由选择控制向量 $u(k)$ 得到的。

2 投资决策动态规划模型的解算

2.1 基本思路

动态规划模型在计算过程可能产生“维数灾难”，必须设法加以克服。为此，首先来分析状态数与各变量间的关系。若每一阶段的决策向量数目为 n ，第 k 阶段的方案数为 m ，则有关系：

$$m = n^d$$

可见，每一阶段可能的方案数目随着阶段变量 k 的增加而显著增加。当规划期总长度 T 增加，阶段总数 N 随之增加时，需要评价的方案数目 m 明显增加，从而使计算量剧增。另一方面，控制向量数目 n 的增加，同样会使方案数 m 增加，导致计算量加大。

由此可知，减少最终状态数目的途径可以有两条：其一，减小 N 值，可由延长每一阶段的时间跨度来实现，这里把这一作法称“加大步长”；其二，减小 n 值，它可由增加约束条件来完

成。这样,解算本动态规划模型的核心问题已经得到解决。

由于“加大步长”可能造成误差,设想将各阶段再次分为子阶段,这里把这一作法称为“减小步长”,在各子阶段再次进行规划计算,确定各子阶段最优扩展方案。本文称这一计算过程为“两步规划法”。

两步规划法以系统峰荷持续稳定增长为前提条件,这与实际情况并不矛盾。第一步可以得到规划期内几个关键点上的最佳装机,由此对系统发展的总体情况进行宏观控制。第二步可对每阶段内的装机作进一步的规划,它是对第一步的调整和补充,两步相辅相成。步长加大的限度应以年峰荷增长速度与备选机组容量大小相互协调来定。两步规划法的特点在于能够得到以阶段为长度的整体最优解。它计算量小,可作经常性的滚动规划计算。

2.2 控制向量 $u(k)$ 的形成

如前所述,为了减小计算量,必须限制扩展形式的数量。电源扩展规划通常考虑在现有机组条件下,规划期内将被安装的可选择机组。文献[1]采用通道约束来形成 $u(k)$,有

$$u^0(k) \leq u(k) \leq u^0(k) + \Delta u(k)$$

$\Delta u(k)$ 是通道约束,即通道宽度,用增机台数表示。本文对通道约束法加以改进,提出了构成阶段控制向量 $u(k)$ 的方法——重复组合法。重复组合法除具有通道约束法中通道宽度取 1 时增机台数合理,状态数目能够接受的优点外,还允许不同类型的机组充分竞争,让不同类型的机组相互组合,从而发挥更大的效益。

表 1 控制变量 $u(k)$ 的构成

序数	火 电	水 电	核 电
1	a_1		
2		b_1	
3			c_1
4	$a_1 + a_2$		
5		$b_1 + b_2$	
6	a_1	b_1	
7		b_1	c_1
8	a_1		c_1
9	$a_1 + a_2 + a_3$		
10		$b_1 + b_2 + b_3$	
11	$a_1 + a_2$	b_1	
12		$b_1 + b_2$	c_1
13	$a_1 + a_2$		c_1
14	a_1	$b_1 + b_2$	
15	a_1	b_1	c_1

若有火电、水电、核电三种机组，每种机组各有3台。考虑核电建设的特殊性，对核电机组的扩建进行限制，每一阶段最多只能扩建一台。用重复组合法，其组合结果见表1所示，共生成15种状态。若有3个阶段，3阶段共形成3375种状态，状态总数较为合理。表1中符号a、b、c的下标是由排序产生的。排序按单位容量费用（该费用为计算期内各项费用之和）从小到大依次排列，以保证单位容量费用较低的机组先投入。

2.3 小步长子阶段搜索计算过程

由大步长动态规划得到的最优整体方案，各阶段装机在阶段末进行，因而在各阶段中期，系统电力、电量不一定能满足要求。在此，将阶段再次细分为子阶段，把各阶段扩展机组安排于各子阶段，以弥补“加大步长”造成的不足。由于相邻阶段间负荷增长量不大，每一子阶段或者可以不增加机组，或者只需增加一台机组，它仅与前一子阶段系统状态发生联系。因此，本文采用搜索计算的方法来作子阶段的规划，以简化计算，提高效率。其搜索方法为：将该阶段已决定投产的机组，按机组容量从小到大，分别对火电和水电进行排序，并依次投入系统。分别计算下述五种方案的费用及可靠性指标，选择其中可靠性指标满足要求，且费用最小的方案为该子阶段最优扩展方案。

- a) 系统不增加机组；
- b) 投入一台火电机组；
- c) 投入一台水电机组；
- d) 投入一台核电机组；
- e) 将上一次投入的小机组换为同类大机组。

4 算 例

下面，用本文提出的模型和算法，对例样系统进行规划试算。例样系统原有装机32台，总容量3400MW，其中火电机组24台，水电机组6台，核电机组2台。规划基准年系统峰荷值2850MW，负荷增长率4%。备选机组有火电9台，容量1390MW；核电3台，容量1200MW；水电9台（座），容量2460MW。系统可靠性约束 $LOLP \leq 0.02$ 。

计算中，将15年规划期分为3个阶段，阶段长度5年；每个阶段分为5个子阶段，子阶段长度1年。规划计算结果列于表2。

从计算结果来看，规划期前3年系统可靠性指标满足要求，可以不新增装机。随着系统负荷逐渐增大，第4年投入一台180MW的火电机组，这时LOLP值仍呈上升趋势。紧接着第5年投入一台400MW的核电机组，使系统状况有所改善，LOLP值下降很多。第15年，LOLP值几乎达到约束上限，这说明规划期内容量投入恰到好处。另外，第3阶段水电机组投入顺序是大机组提前，小机组延后，说明小步长搜索算法已经实现。计算结果表明，本文建立的模型和设计的算法是合理的，可行的。

表 2 规划结果及系统参数(MW)

阶段 序号	子阶段 序号	系统最大负荷 (MW)	总装机容量 (MW)	新增装机容量(MW)			LOLP
				火	水	核	
第一 阶段	1	2964	3400				0.0027
	2	3082	3400				0.0061
	3	3205	3400				0.0129
	4	3334	3580	180			0.0132
	5	3467	3980			400	0.0067
第二 阶段	6	3606	3980				0.0141
	7	3750	4380		400		0.0052
	8	3900	4380				0.0115
	9	4056	4780			400	0.0065
	10	4218	4780				0.0144
第三 阶段	11	4387	5020	240			0.0155
	12	4562	5620		600		0.0127
	13	4745	5900		280		0.0047
	14	4935	5900				0.0093
	15	5132	5900				0.0196

5 结 论

本文建立的电源长期扩展投资决策模型,考虑了装机时间与装机容量的离散性,克服了用混合整数规划等方法得到的连续解在实施过程中可能产生误差的不足。与生产模拟的等效电量函数法相配合,它能对水、火电混合系统进行规划。本文提出的解算动态规划模型的算法——两步规划法,能够得到规划期内以阶段为长度的整体最优解,解决了电源长期扩展动态规划模型解算中可能产生的“维数灾难”问题。该方法计算量小,可作经常性的滚动规划计算。对例样系统计算表明,本文提出的模型和算法是合理的,计算效果较好,简单、实用。

参 考 文 献

- 1 International Atomic Energy Agency. Expansion Planning for Electrical Generating System, a Guidebook, Technical Reports Series No. 241, Vienna 1984
- 2 罗伯特 E·拉森等著,陈伟基译. 动态规划原理,北京:清华大学出版社,1984
- 3 Ahmed N. U., Ahsan Q. "A Dynamic Model for Generation Expansion Planning", Electric Power System Research, 9(1985), 79~86
- 5 王众托等. 火电电源规划的优化模型与程序系统,系统工程理论与实践,1989,(3)