

# 不確実な環境下における発電設備の投資計画の一手法

(株)東芝 研究開発センター \*半田 恵一 HANDA Keiichi, 内平 直志 UCHIHIRA Naoshi,  
(株)東芝 電力・社会システム社 松本 茂 MATSUMOTO Shigeru, 中本 政志 NAKAMOTO Masashi

## 1. はじめに

発電設備の投資計画問題は、種々の不確実な外部環境（将来の需要量や燃料価格の変化等）の下で、設備の新設やリプレース等の長期計画を立てる問題である。通常1期数年とし、外部環境に応じて期ごとに設備の新設やリプレース等のオプションを選択決定する。外部環境は期ごとに変わりうるため、指致オーダーのシナリオ（期ごとの外部環境の組合せ）を考慮する必要があり、最適な投資計画を高速に求めるのは難しい。従来の設備投資計画手法としては、決定木分析[1]やリアルオプション分析[2]が知られており、ツールも整備されている。しかしそれらの手法はシナリオが比較的単純な場合を想定している。

本稿で提案する手法は決定木をベースに、各シナリオに対して設備運用時の利益の現在価値を計算し、決定木の各意思決定ポイントにおいて利益最大のオプションを選択するものである(cf. [3], [4])。最近の発電設備の投資計画においては、設備の新設よりもむしろ既存設備を補修しながら長期間使用したいという要望が強い。そこで我々は設備の故障確率(cf. [5])を考慮に入れ、設備ごとに「投資なし(継続運転)、大型補修、リプレース」というオプションを用意する。ここで大型補修とは、故障する前に行う補修であり、新設計の部品への変更も想定しているため熱効率(性能)の向上にも寄与するオプションである。本手法の特徴は、(1)故障確率をもとにリスクコストを計算して運用の長期化によるリスクの増大や大型補修の実施によるリスクの減少を考慮する。(2)大型補修を実施した設備については熱効率を向上させる。(3)設備運用時の利益計算をできるだけ現実に沿った形で正確に高速に計算する。

本稿では、意思決定木に基づくモデル化とアルゴリズムの概要を中心に述べる。

## 2. モデル化

### 2.1. 意思決定木とキャッシュフロー

意思決定木は、オプションと不確実性要因から想定されるあらゆるケースを期ごとに段階的に表現した根付き木である。発電設備の投資計画の場合は電力需要と燃料価格が主な不確実性要因となる。それぞれに増加/減少[上昇/下降]という2つの状態があるとみなすと、4通りのシナリオを定義することができる。例えば電力需要が増加、燃料価格が下降というのが1つのシナリオである。オプションは設備ごとに「投資なし/大型補修/リプレース」を用意する。ここで、リプレースは既存設備を休止し代わりに新規設備を1台追加することを意味する。既存設備が  $n$  台あればオプション数は3の  $n$  乗となる。 $n = 2$  の場合の意思決定木を図1に示す。

オプションには通番 0, 1, ...,  $3^{n-1}$  を付す。このオプション番号と実際の投資内容の間には、次のようにして対応関係を付けることができる。即ち、オプション番号の3進数表現を  $n$  桁のベクトルとして見たときのインデ

ックスを設備番号とみなし、3進数の文字 0, 1, 2 をそれぞれ、投資なし、大型補修、リプレースとみなす。例えば図1のオプション番号7は、その3進数表現が“21”なので、設備1をリプレースして設備2を大型補修すると解釈できる。なお、リプレースに伴い追加される新規設備の設備番号は、もとの既存設備の番号を継承するものとする。

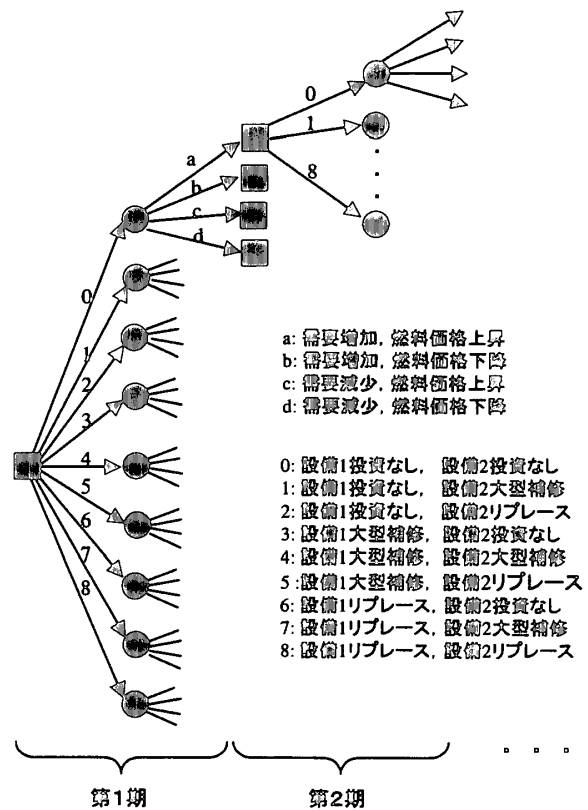


図1 意思決定木 ( $n = 2$  の場合)

リプレースに伴い追加される新規設備も大型補修の対象とするが、新規設備を更にリプレースすることはしないものと仮定する。これによって、同一番号の設備を2回以上リプレースするという意思決定パスが除外でき、処理の高速化につながる。

キャッシュフローと固定費は次のように定義する。

$$\begin{aligned} \text{キャッシュフロー} &= \text{売電収入} - \text{燃料費} - \text{固定費} \\ \text{固定費} &= \text{人件費} + \text{減価償却費} + \text{その他の費用} \end{aligned}$$

大型補修やリプレースというオプションは主に燃料費と減価償却費に影響を与える。

### 2.2. 故障確率と減価償却費

各設備は、建設年度または大型補修実施年度以降、その運用年数に従い故障する確率が年々上昇していく。実際の設備運用では通常、故障したら修理して再稼動する。

我々のモデルでは、各期における故障の有無から、復旧を考慮した故障確率を算出して用いている。

第  $k$  期における任意のオプションと任意のシナリオに対する減価償却費は、各設備に対する第  $k$  期までの意志決定情報をもとに計算する。即ち、設備ごとに、第  $k$  期までの意志決定情報をもとに減価償却費を計算し、全設備の減価償却費の和を求める（第  $k$  期までにリプレースで休止になった既存設備があれば、それらの減価償却費も加算する）。

各設備  $i$  の減価償却費を計算する際、故障確率に基づくリスクコストと大型補修費用を、設備  $i$  の本来の減価償却費に加算する。例えば、第  $k$  期における設備  $i$  に対する意思決定が「投資なし」の場合は、設備  $i$  を前回大型補修した年（1回も大型補修をしていない場合は建設年度で代用）からの経過年数に応じて故障確率に基づきリスクコストを求め、設備  $i$  の本来の減価償却費に加算する。意思決定が「大型補修」の場合は、設備  $i$  を大型補修する場合のコストの期待値を、故障確率をもとに求め、設備  $i$  の本来の減価償却費に加算する。なお、大型補修を行った場合は、その設備のリスクコストは 0 に初期化される。

### 3. アルゴリズム概要

**Step 1. 入力：** 既存設備の仕様（建設年度、人件費・減価償却費等の初期値、熱効率、設備容量、最小・最大稼働率、前回大型補修した年度等）、新規設備の仕様、燃料（石油/LNG/石炭）価格と年間需要量の初期値、人件費の増加率、減価償却費の減少率、現在価値への割引率、大型補修単価、燃料価格と需要量の増減確率および変動率、売電単価、故障確率などを入力する。

**Step 2. 意思決定木を基本的に最終期（第  $m$  期）から第 1 期に向かって解いていく。** 即ち、第  $k$  期の意思決定ノードにおいては、その子孫である第  $k+1$  期の（ $3^n \times 4$  個の）意思決定問題それぞれのキャッシュフローの期待値を反映して、意思決定問題を解く。ここで  $k$  は  $m$  以下の値で、第  $m+1$  期のキャッシュフローは 0 とみなす。  $n$  は既存設備の数を表す。

第  $k-1$  期までのオプションとシナリオの番号によって特定される任意のパス  $p$  に対する第  $k$  期の意思決定問題では、第  $k$  期の各オプション  $x$  ( $= 0, 1, \dots, 3^n-1$ ) に対して、4通りのシナリオのもとでのキャッシュフローの期待値  $CF(x)$  をそれぞれ求め、 $CF(x)$  が最大となるオプション  $x_k$  を選択する。 $CF(x)$  は次の手順で計算する。

- (1) 各設備の減価償却費等の固定費を計算する。
- (2) 大型補修を実施した設備の熱効率を向上させる。
- (3) 設備を単位電力量あたりの粗利益 (= 売電単価 - 燃料単価/熱効率) の大きい順にソートする。
- (4) 各シナリオ  $i$  ( $= a, b, c, d$ ) におけるキャッシュフロー  $cf(x, i)$  を次の手順で求める。

(4-1) 種々の制約条件のもとで、最大の利益を上げられるような各設備の稼働率を求めて粗利益 (= 売電収入 - 燃料費) を計算し、固定費を引き、更に割引率を用いて現在価値に直す。

(4-2) 既に意思決定済みの子の(第  $k+1$  期の)キャッシュフローの期待値を加算する。

(5)  $CF(x) := \sum_i cf(x, i) \times prob(k, i)$ . ここで  $prob(k, i)$  は第  $k$  期においてシナリオ  $i$  が起こり得る確率を表す。

最後に第 1 期の意思決定問題を解いたら Step 3 に進む。

**Step 3. 出力：** 最適投資計画の結果を出力する。また、シナリオパス（各期のシナリオの組合せ）ごとにキャッシュフローや各設備の稼働率等のデータを出力する。

### 4. 実験

実験の結果得られた最適投資計画の例を以下に示す。この実験では既存設備 3 台をリプレースおよび大型補修の対象とし、第 4 期まで実行した（1 期 10 年）。

第1期	101
第2期	<u>121</u> 101 121 101
第3期	201 101 <u>201</u> 101; 111 101 101 101; 201 101 201 101; 101 101 101 101
第4期	001 001 001 001; 101 101 101 101; 001 001 <u>001</u> ; 101 101 101 101; 121 101 121 101; 111 010 111 010; 121 111 121 111; 111 010 111 010; 001 001 001 001; 101 101 101 101; 001 001 001 001; 101 101 101; 121 111 121 111; 111 010 111 010; 121 111 121 101; 111 010 101 000

各期の数値は 3 進数である（意味は 2. 1 項参照）。第 2 期では第 1 期における 4 つのシナリオを想定した場合の意思決定を列挙している（順番はシナリオ  $a, b, c, d$  の順）。第 3 期では、第 2 期の各意思決定に対してそれぞれ 4 つのシナリオを想定した場合の意思決定を列挙している。第 4 期も同様。下線部は第 1~3 期のシナリオが  $a, c, d$  のように変化した場合の第 2~4 期における最適な意思決定を表している。

### 5. おわりに

故障リスクを考慮した設備投資計画の一手法を提案した。故障確率に基づくリスクコストと補修費用をモデル化し、シナリオごとに最適な投資計画を提示するものである。オプション数が指数オーダーのため高速化が課題である。

#### 参考文献

- [1] PrecisionTree, Palisade Corporation, <http://www.palisade.com/html/ptree.html>
- [2] L. Trigeorgis, Real Options, MIT Press, 1996.
- [3] 内平, 武田, 中本, 松本, 不確実性を考慮した設備投資計画手法, 第 65 回情処全大, 4, pp. 309-310, 2003.
- [4] 武田, 田口, 内平, 中本, 松本, 不確実な事業環境下における設備投資計画手法, 第 15 回 RAMP シンポジウム論文集, pp. 118-134, 2003.
- [5] 藤山, 藤原, 児玉, 齊藤, 吉瀬, 岡崎, 蒸気タービンにおけるフィールドデータの信頼性解析に基づくリスク評価法, 材料, Vol. 52, No. 1, pp. 28-33, 2003.