

火力発電機群の起動停止問題における 起動優先順位に関する考察

山 城 迪*

中 村 陽 一**

(昭和 50 年 4 月 18 日受理)

A Study of the Start-up Priority in the Start-up and Shutdown Problem of Thermal Units

by Susumu YAMASHIRO and Yōichi NAKAMURA

The problem of start-up and shutdown of power units is a very important factor in the economic operation of power systems.

In actual power system operation, the start-up priority method is used for this problem because of simplicity.

When we strictly pursue the economic operation, the non-priority method is needed and the author has proposed one method of "non-priority".

In this paper, some discussion is given concerning the priority and non-priority methods about the economic operation pattern which is given by a simple model system analysis.

1. 緒 言

電力系統の短期経済運用においては、火力発電機群の起動停止問題が重要な要素であるが、現実の系統運用においては、主として、その取り扱いの簡便さから、起動優先順位（以下、簡単に優先順位と呼ぶ）にもとづく起動停止計画の決定がなされる場合が多い。

しかしながら、既に論じたように¹⁾、厳密に経済性を追求しようとする場合には、優先順位に依存しない問題の解法が要求され、文献(1)においてそのための手法を提案した。

小論は、文献(1)で示した手法をもとにして、様々な組合せの優先順位に対して、それが、起動停止計画にどのような影響を与えるか、また、経済性への影響はどうであるか、といった問題等について、簡単なモデル系統での試算をもとにして考察を試みるものである。

2. 問題の定式化

優先順位に依存しない場合の解法についての詳細は文献¹⁾で報告済みなので、以下では、

* 北見工業大学電気工学科

** 電元オートメーション

本論の説明に必要と思われる点を概略再記することにする。

いま、電力系統が M 台の起動停止用火力発電機によって構成される場合、並列発電機群としては、 2^M 通りの組合せが得られるから、この各々に番号 $i(1, 2, \dots, 2^M)$ を与え、かつ日間の第 n 時間帯での並列発電機群 i を集合 ${}^n\mathbf{u}^i$ で表わす。

次に、ダイナミックプログラミングを用いると、第 n 時間帯末までの累積運転費は次のようになる。

$$\begin{aligned} \phi^n({}^{n-1}\mathbf{u}^j, {}^n\mathbf{u}^i) &= \sum_m f_m^n(G_m^n) + \sum_{m'} \left\{ fS_{m'}^n(\tau_{m'}^n) - fS_{m'}^{n-1}(\tau_{m'}^{n-1}) \right\} \\ &+ \Phi^{n-1}({}^{n-1}\mathbf{u}^j) \quad n = 2, 3, \dots, N \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 f は火力機の燃料費、 fS' は起動費、 G は出力であり、ユニット u_m および $u_{m'}$ は各々、 $u_m \in {}^n\mathbf{u}^i$ 、 $u_{m'} \in {}^n\mathbf{u}^i$ 。また、右辺第 2 項は、 $u_{m'}$ の第 n 時間帯における起動費を示し、 $\tau_{m'}^n$ は $u_{m'}$ の時間帯 n での停止時間であり次式が成立する。

$$\tau_{m'}^n = \tau_{m'}^{n-1} + \delta, \quad u_{m'} \in {}^n\mathbf{u}^i, \quad \tau_{m'}^n = 0, \quad u_{m'} \in {}^n\mathbf{u}^i \quad (2)$$

δ : 時間帯幅、 u_m : 第 m 号機

さて、(1) 式を ${}^{n-1}\mathbf{u}^j$ について最小化操作を行うと、

$$\Phi^n({}^n\mathbf{u}^i) = \min_{n-1} \left\{ \phi^n({}^{n-1}\mathbf{u}^j, {}^n\mathbf{u}^i) \right\} \quad (3)$$

ただし、 $n=1$ の場合は

$$\Phi^1({}^1\mathbf{u}^i) = \sum f_m^1(G_m^1) \quad (4)$$

(1)~(4) 式の漸化式から最適運用を決定することができる。

以上は、優先順位に依存しない場合であるが、これに優先順位を適用しても問題の構造は全く変化なく、ただ、並列発電機群の組合せが変わるだけである。

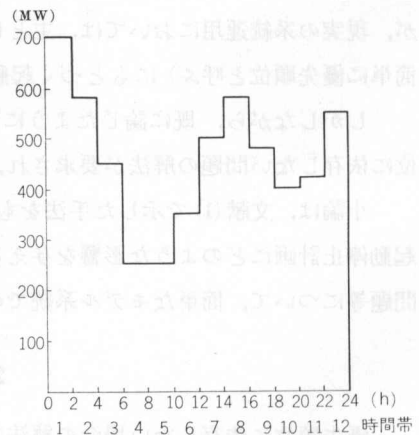
すなわち、起動優先順位を定める結果、考えられる並列発電機群の数は 2^M 個から、 $M+1$ 個に減少し、その結果問題の解析が一層容易になることがわかる。これは優先順位法の最大の利点である。

なお、上式では起動に必要な最小停止時間については何等言及していないが、この制約条件を考慮する場合の解法については、文献(1)を参照願いたい。

3. モデル系統での試算結果

3.1 モデル系統と計算結果

第 1 図に示す系統負荷と第 1 表の特性を持つ火力



第 1 図 負荷パターン

Fig. 1. Load pattern.

第1表 発電機特性定数

Table 1. Characteristic constants of units

発電機 No.	燃料費 $F=a+b\cdot G+c\cdot G^2$ (千円)			起動費 k (千円/hr)	出力 (MW)	
	a	b	c		\bar{G}	G
u_1	6.90	0.648	0.00105	—	175	50
u_2	11.74	1.189	0.00110	—	125	40
u_3	8.64	0.756	0.00259	—	125	40
u_4	12.96	0.648	0.00432	5.2	125	40
u_5	6.90	1.390	0.00375	3.2	75	20
u_6	12.40	1.250	0.00163	3.0	75	20

第2表 起動優先順位

Table 2. Start-up priority

起動優先順位			
A	u_4	u_5	u_6
B	u_4	u_6	u_5
C	u_5	u_4	u_6
D	u_5	u_6	u_4
E	u_6	u_4	u_5
F	u_6	u_5	u_4

第3表 並列発電機群の構成

Table 3. Construction of group of running units

並列 発電機群	発電機 No.					
	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6
u^1	○	○	○	×	×	×
u^2	○	○	○	×	×	○
u^3	○	○	○	×	○	×
u^4	○	○	○	○	×	×
u^5	○	○	○	×	○	○
u^6	○	○	○	○	×	○
u^7	○	○	○	○	○	×
u^8	○	○	○	○	○	○

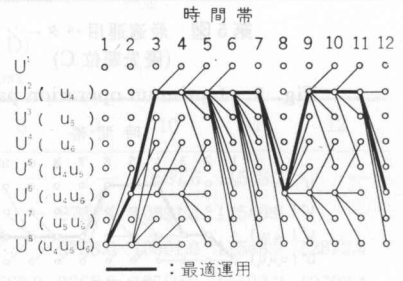
○：並列 ×：解列

発電機群とからなるモデル系統について試算を行った。ただし、火力発電機中、 $u_4 \sim u_6$ の3台を起動停止用火力とし、残りはベース用火力とした。従って、考えられる優先順位は第2表のA~Fまでの6通りである。また第3表に並列発電機群の構成を示す。

第2図には、比較検討のため優先順位に依存しない場合の最適運用パターンを示す。

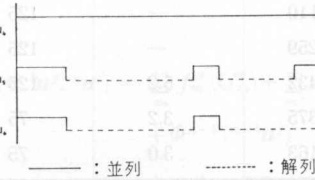
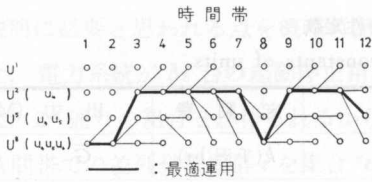
第3図~第8図には、A~Fまでの優先順位に対する運用パターンを示しているが、第2図も含めて、これらの例では起動に必要な最小停止時間はすべて6時間とした。

また、第4表~第9表は、第3図~第8図に対応して、運用初期時点から各時間帯末までの累積運転費を記録したものである。



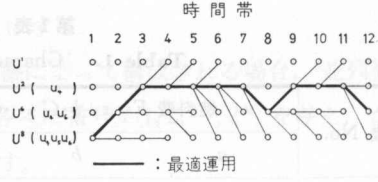
第2図 最適運用パターン (優先順位によらない場合)

Fig. 2. Optimum operation pattern (non-priority)



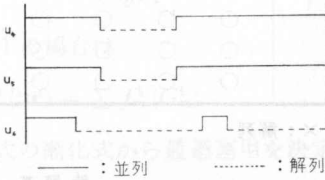
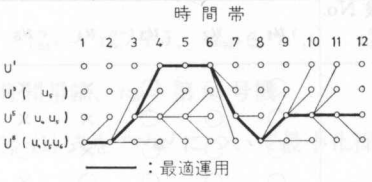
第3図 最適運用パターン
(優先順位 A)

Fig. 3. Optimum operation pattern.



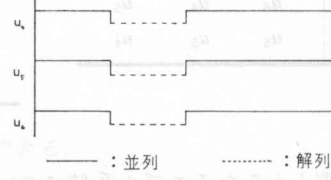
第4図 最適運用パターン
(優先順位 B)

Fig. 4. Optimum operation pattern.



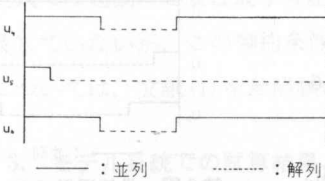
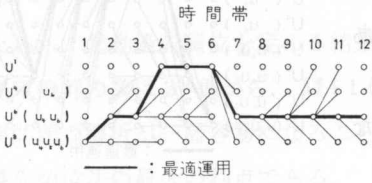
第5図 最適運用パターン
(優先順位 C)

Fig. 5. Optimum operation pattern.



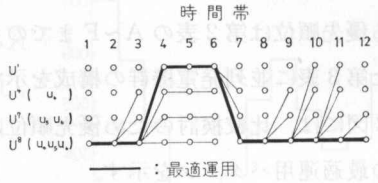
第6図 最適運用パターン
(優先順位 D)

Fig. 6. Optimum operation pattern.



第7図 最適運用パターン
(優先順位 E)

Fig. 7. Optimum operation pattern.



第8図 最適運用パターン
(優先順位 F)

Fig. 8. Optimum operation pattern.

第4表 運転費 (優先順位 A)

(単位: 千円)

Table 4. Operation cost

$u \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
u^1	—	—	—	4690.8	5233.2	6011.2	—	—	—	10495.6	11422.2	—
u^2	—	—	4142.6	4684.8	5227.2	5973.6	7114.8	—	9574.6	10444.0	11365.8	12660.0
u^5	—	3150.6	4148.4	4714.2	5280.2	5988.4	7117.8	8500.0	9578.8	10456.0	11386.0	12654.6
u^8	1765.2	3140.6	4159.6	4755.4	5320.0	6010.2	7125.8	8490.0	9588.4	10481.8	11409.2	12656.0

第5表 運転費 (優先順位 B)

Table 5. Operation cost

$u \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
u^1	—	—	—	4689.2	5231.4	6009.6	—	—	—	10492.2	11418.0	—
u^2	—	—	4140.8	4683.2	5225.4	5971.8	7223.0	—	9571.2	10440.6	11362.4	12657.2
u^6	—	3138.8	4151.0	4721.4	5291.8	5991.2	7119.2	8486.4	9579.2	10461.6	11395.4	12649.4
u^8	1765.2	3140.6	4159.6	4755.4	5317.2	6008.4	7124.2	8488.2	9585.0	10472.6	11404.0	12652.4

第6表 運転費 (優先順位 C)

Table 6. Operation cost

$u \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
u^1	—	—	—	4696.6	5245.0	6029.2	—	—	—	10558.6	11493.8	—
u^3	—	—	4208.6	4717.2	5283.0	6071.4	7273.6	—	9718	10562.4	11496.2	—
u^5	—	3150.6	4148.4	4714.2	5280.2	6041.4	7173.4	8558.6	9637.6	10515.6	11444.6	12733.6
u^8	1765.2	3140.6	4159.6	4755.4	5320.0	6063.2	7181.4	8548.6	9647.2	10540.6	11467.8	12734.8

第7表 運転費 (優先順位 D)

Table 7. Operation cost

$u \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
u^1	—	—	—	4708.0	5256.4	6040.6	—	—	—	10587.6	11538.2	—
u^3	—	—	4208.6	4728.6	5297.4	6088.4	7285.0	—	9737.4	10591.4	11540.6	—
u^7	—	—	4211.2	4755.0	5350.2	6150.2	7252.8	—	9723.0	10601.0	11548.2	12872.4
u	1765.2	3140.6	4159.6	4755.4	5351.2	6129.2	7192.8	8568.0	9666.6	10560.0	11502.2	12792.4

第8表 運転費 (優先順位 E)

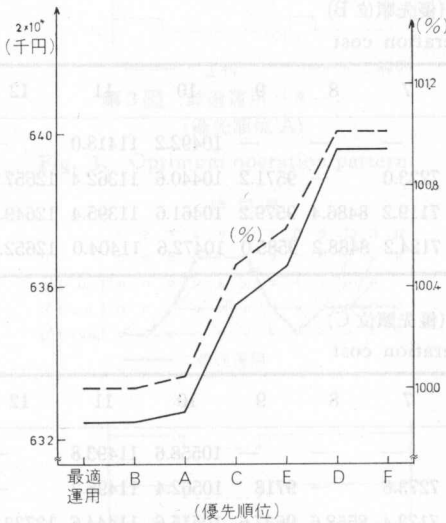
Table 8. Operation cost

$u \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
u^1	—	—	—	4699.4	5247.8	6031.8	—	—	—	10566.4	11506.2	—
u^4	—	—	4205.8	4724.4	5294.8	6087.6	7243.4	—	9705.4	10574.0	11511.2	—
u^6	—	3138.8	4151.0	4721.4	5291.8	6057.6	7179.2	8552.6	9645.4	10528.0	11461.6	12748.6
u^8	1765.2	3140.6	4159.6	4755.4	5317.2	6075.0	7184.2	8554.4	9651.2	10538.8	11470.0	12751.6

第9表 運転費 (優先順位 F)

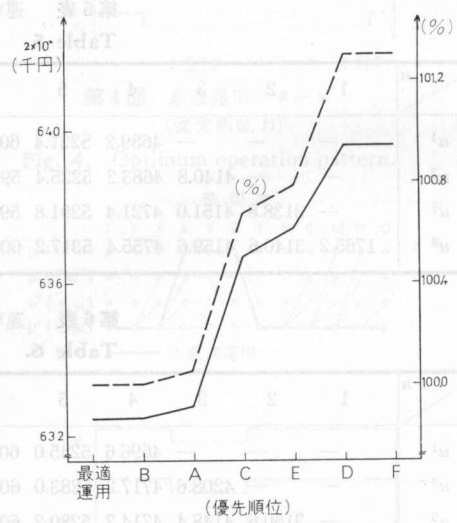
Table 9. Operation cost

u \ n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
u^1	—	—	—	4708	5256.4	6040.6	—	—	—	10587.6	11538.2	—
u^4	—	—	4207.4	4733.0	5306.4	6102.0	7252.0	—	972.0	10595.2	11543.4	—
u^7	—	—	4211.2	4755.0	5350.2	6154.2	7252.8	—	9723.0	10601.0	11548.2	12872.4
u^8	1765.2	3140.6	4159.6	4755.6	5351.2	6134.2	7192.8	8568.0	9666.6	10560.0	11502.2	12792.4



第9図 優先順位と運転費 (T=2h)

Fig. 9. Priority and cost.



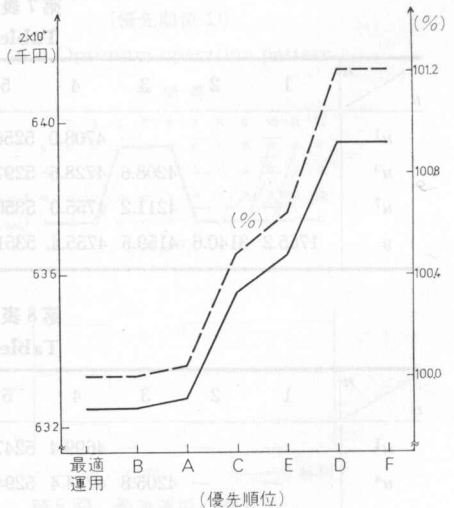
第10図 優先順位と運転費 (T=4h)

Fig. 10. Priority and cost.

第9図～第13図では、起動に必要な最小停止時間を、それぞれ、2, 4, 6, 8, 10時間と仮定した場合の、優先順位と運転費の関係を示した。なお、第1時間帯においては全ユニット並列と仮定した。

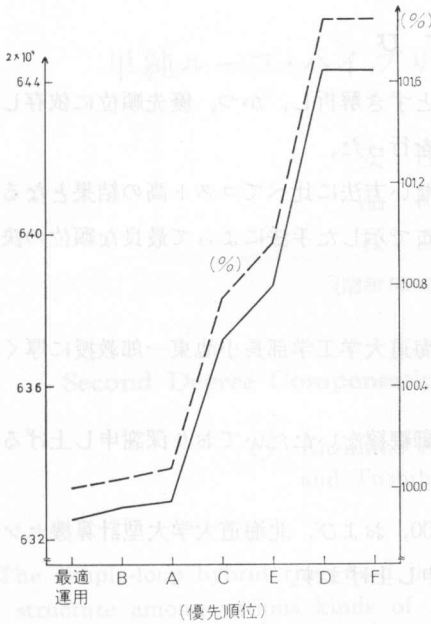
3.2 考察および検討

第2図と第4図を比較してわかる通り、このモデルシステムでは起動順位を u_4, u_6, u_5 とした場合に最適解が得られることがわかる。このように優先順位を決定することの妥当性は、各ユニットの燃料費特性からもうなずける結果ではあるが、注意しなければならない点は、このような結果 (優先順位法が第2図の最適解と一致したという点) は偶然であって、一般には、他の優先順位による結果にも見られる通



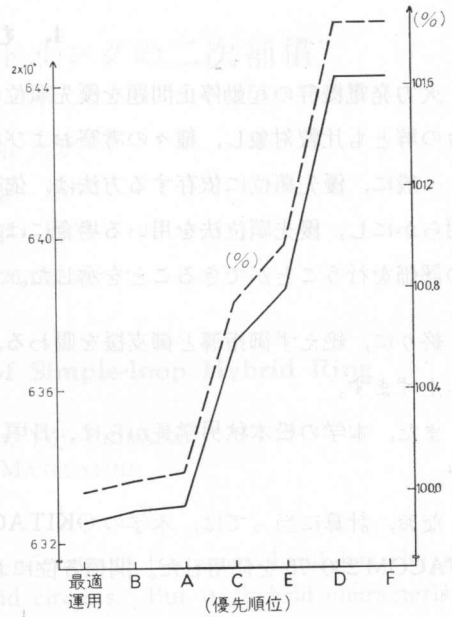
第11図 優先順位と運転費 (T=6h)

Fig. 11. Priority and cost.



第12図 優先順位と運転費 (T=8h)

Fig. 12. Priority and cost.



第13図 優先順位と運転費 (T=10h)

Fig. 13. Priority and cost.

り、優先順位法では常に最適解が得られるという保証はないということである。例えば、起動に必要な最小停止時間を8時間とした第12図の例はどのような優先順位によっても最適解が得られないことを示しており、第13図についても同様のことがいえる。

第9図～第13図を見ると、組合せの良し悪しによって運転費が変動するが、最適解を1とした場合、最悪の優先順位法で約1%から1.8%程度のコスト増となっていることがわかる。従って優先順位を決定する場合には慎重でなければならない。現在行われている一つの順位決定法には、一般的に効率の良い発電機を優先させる方法がある。この方法は起動に必要な最小停止時間の制約を無視したとしても、等増分燃料費則の示す通り、各ユニットの増分コスト曲線が交わると、負荷の変動に伴い並列すべきユニットが変わってくるから、瞬時的な立場からは、その時点での負荷に対して並列すべきユニットを決定する（これを、unit commitment と称する）ことができて、負荷の時系列を考えたときは、つまり、日間のようなある運用期間を考えた場合には、このような優先順位法による経済性の追求には自ずと限界があるといえる。さらに、起動に必要な最小停止時間を考慮に入れる場合には、一層この事が顕著になる。

従って、優先順位を決定する場合には、効率による方法よりは、むしろ、ここで示した手法を用いるのが望ましい。

すなわち、考えられるすべての優先順位の組合せについて本手法によりコストの比較を行えばよく、さらに、優先順位に抱束されない場合について最適解を求めておけば、順位の決定はもとより、その順位法による運用計画に対する経済評価を行うことができる。

4. む す び

火力発電機群の起動停止問題を優先順位にもとずき解析し、かつ、優先順位に依存しない場合の解とも比較対象し、種々の考察および検討を行った。

一般に、優先順位に依存する方法は、依存しない方法に比べてコスト高の結果となることを明らかにし、優先順位法を用いる場合には、ここで示した手法によって最良な順位の決定とその評価を行うことができることを示した。

終りに、絶えず御指導と御支援を賜わる、北海道大学工学部長小池東一郎教授に厚くお礼申し上げます。

また、本学の松本秋男学長からは、日頃より御鞭撻をいただいております。深謝申し上げる次第です。

なお、計算に当っては、本学の OKITAC-4500、および、北海道大学大型計算機センターの FACOM 230-75 を使用した。関係各位にお礼申し上げます。

文 献

- 1) 山城：電気学会論文誌 B 分冊, Vol. 93, 391 (1973).
- 2) 宮田：電力系統の計画と運用 (電気書院).