燃料消費量制約を考慮した火力発電機群の 月間起動停止計画決定手法

正 員 山 城 迪 (北見工大)
 学生員 今 野 互 (北見工大)
 正 員 佐 藤 正 廣 (北海道電力)

A Monthly Thermal Unit Commitment Scheduling Method with Fuel Constraints

Susumu Yamashiro, Member, Tohru Konno, Student (Kitami Institute of Technology)

Masahiro Sato, Member (Hokkaido Electric Power Company)

As the power generation planning has become more complex in recent years due to energy resource and environmental constraints as well as current deregulation in the electric power industry, the more detailed long term generation planning, such as monthly planning, taken into account those circumstances must be developed based on the composite view point. In this long term generation planning, the fuel consumption schedule under the given total amount of fuel supply is very important and the computatively effective thermal unit commitment method is also required for the long term operation.

Assuming that an total amount of fuel is allocated for the group of thermal units which use the same kind of fuel, we propose an monthly unit commitment scheduling method with fuel constraint in this paper. The proposed method is basically an extended version of the iterative optimization algorithm based weekly unit commitment method developed by authors earlier and includes algorithms being able to deal with the fuel constraint imposed on the group of thermal units.

Through numerical examples, we show the meaning of the development of monthly unit commitment method and the usefulness of the proposed method in terms of computing burden and flexibility.

キーワード：起動停止計画，燃料消費量制約，月間運用計画，繰返最適化

1. はじめに

電力系統の発電計画問題は，資源・環境対策に加えて，規制緩和に伴う非電気事業者の発電部門への進出など，様々な要因を抱え，近年ますます複雑さを増してきている。

このような状況下では，時間単位の経済負荷配分計画や，日間の起動停止計画など，従来の経済運用計画の中心となるテーマに加えて，月間や，更には年間にわたる経済性や信頼性を考慮した総合的な判断の上に立った，より詳細な長期の発電計画作成が，今後一層重要視されるようになるものと考えられる。

長期の発電計画決定においては，系統の負荷予測，発電機の補修計画，あるいは燃料計画などが密接に関係してくるが，特に，LNG，石油，石炭などの大部分を海外からの供給に依存しているわが国においては，系統運用の経済性の面からも年間の燃料消費量の適切な計画策定とそれに関連した年間を通した系統運用計画が要求される。

一方，このような年間運用計画策定の基礎となる日間や週間単位の火力の起動停止計画手法に関しては，これまで

多くの研究がなされてきたが，月間などの長期間を対象にした報告は筆者等の知る限り余り見当たらない^{(2),(3)}。

本論文は，種々の火力燃料について，年間の燃料供給計画を基に月間での燃料消費量が割り当てられる場合を想定し，この燃料制約を満足し，かつ，最も経済的運用になるような，取り扱いの容易で計算効率の良い火力発電機群の月間起動停止計画の決定手法を提案する。

提案手法は，基本的には，筆者等が文献(1)で報告してきた繰返最適化のアルゴリズムを用いた週間起動停止計画法を月間に拡張したものであるが，これまでの起動停止計画が週単位でしかも燃料制約が発電機毎に与えられているのに対して，ここでは，月間を単位とし，使用燃料の種類毎に，複数台から成る発電機グループ毎に燃料制約が与えられる場合の制約処理を含む起動停止計画を求めている。

以下，本論文の基礎となる繰返最適化のアルゴリズムの概略を述べ，次いで，発電機グループ毎に課せられた燃料制約の処理法を提案した後，モデル系統への適用例を示し，月間起動停止計画策定の意義を明らかにすると同時に，計算の高速性，拡張性，実用性などの面から提案手法の有効

性を検討する。

2. 繰返最適化アルゴリズム⁽¹⁾

後の議論の都合上、繰返最適化アルゴリズムによる起動停止計画決定の概要を以下に述べるものとする。

火力発電機の最小停止時間、最小運転時間、出力変化速度、運転予備力確保、あるいは燃料消費量といった、多くの制約を考慮した起動停止計画を決める場合、解析的なアプローチではほとんど不可能に近いので、無制約の起動停止パターンから出発し、段階的に制約を取り入れた計画へと逐次運用パターンを更新していく、ヒューリスティックな繰返最適化アプローチを採用するものとする。

図1 繰返最適化の手順

Fig. 1. Procedure of iterative approach

図1に示す繰返最適化の手順は次の通りである。

- ステップ1: 「初期起動停止パターンの生成」では、各時間における最も経済的な負荷配分を行う並列発電機群を動的計画法から求め、得られる並列発電機の時系列として初期の起動停止パターンを求める。
- ステップ2: その結果、期間内での発電量から期間内での各発電機毎の利用率が求まるので、この利用率の順位に従って、起動優先順位を与えるものとする。
- ステップ3: 起動停止パターンが運転予備力(OR)を確保していなければ優先順位に従って、発電機を系統に並列する。また、最小運転時間(MUT)および最小停止時間(MDT)を満足していなければ、これらの制約を満すようにパターンの修正を行う。

その後再び、運転予備力確保の検討を行う。

ステップ4: ステップ3で得られたパターンに対して、発電機出力変化速度制限を満足できるか否かをチェックし、再びパターンの修正を行う。

ステップ5: ステップ4までの運用計画で燃料消費量制約が満足されない場合は、燃料消費量の目標値からの逸脱量を用いて、例えば図2に示すような増分燃料費特性 λ' を仮りに想定し、再びステップ3からの手順を繰り返す。

図2 仮想増分燃料費特性 λ' ($c = c'$ の場合)

Fig. 2. Fictitious incremental fuel cost

ここで、仮想増分費特性 λ' は次のようにして求める。

いま、ステップ5において求まる、燃料制約からの単位時間当たりの逸脱量を ΔS とすると、

$$\Delta S = (S - C)/h \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 S 、 C 、 h は各々、発電機の燃料消費量制約、運用計画による燃料消費量、および並列運転時間を表す。

一方、考察期間における並列運転中の発電機の平均出力が、 P から $P + \Delta P$ に変化したとき ΔS が零になるものとするれば、 $P + \Delta P$ は次式から算出することができる。

$$S/h = \alpha + \beta(P + \Delta P) + \gamma(P + \Delta P)^2 \quad \dots\dots (2)$$

ここで、 α 、 β 、 γ は発電機の燃料消費特性を表す定数。

(2)式から、図2を参照して、出力 P での増分燃料費の値が、出力 $P + \Delta P$ でのそれに等しくなるように

$$\lambda = b + 2cP = b' + 2c'(P + \Delta P) \quad \dots\dots\dots (3)$$

仮想特性の b' 、 c' を決めることができる。ここで、 b 、 c 、 b' 、 c' は燃料費特性の定数。

3. 月間燃料消費量制約の処理法

一般に、日間などの比較的短期間の運用における燃料制約は、各発電機毎に与えられるのに対して、月間などの長期運用においては、系統全体として確保されている各種の燃料を、燃料種別毎にどう当該期間に割り付けるか、あるいは割り当てられた燃料をどう消費していくかがより重要になる。即ち、各発電機個々ではなく、一つのグループとして同じ燃料を使用する火力機を把握し、このグループに全体として燃料消費量制約が与えられ、それに対し、グ

ループ内の発電機をどのように運用すれば、最も経済的に燃料制約を満足できるのかを決めることになる。

いま、系統で使用する燃料の種類を g で、また、燃料 g を使用する発電機を i で表し、かつ、発電機 i が月間で消費する燃料の消費量を C_i^g とし、課せられる燃料制約量を ET^g とすると、消費量と制約量との間の差分は、

$$\Delta C^g = ET^g - \sum C_i^g \quad \dots\dots\dots (4)$$

仮に、何等かの方法により、 ΔC^g を各発電機に割り振ることができれば、以後は、前章に述べた仮想増分燃料費特性による発電機毎の制約処理法を用いることができ、文献(1)の起動停止計画法の月間への適用が可能となる。

同種の燃料を使用する発電機グループに与えられる燃料制約を満足するために、(4)式の差分を発電機間に配分する方法として、ここでは、経済性や計算の効率性を考慮して、次の3種類の方法について検討するものとする。

(1) **余力比案分法(処理法a)** いま、図1に示す起動停止計画のステップ4の段階で得られる燃料消費量制約を考慮しない運用について、燃料消費量が求まり、これから(4)式の差分 ΔC^g が求まったとする。このとき、発電機 i の、並列運転時における単位時間当たりの平均運転余力(定格出力からの差分)から、定格出力運転までの可能性を想定して、使用可能な燃料の増分 Δq_i を求めることができるので、差分 ΔC^g を、できるだけ起動停止パターンは変えずに、この運転余力に相当する Δq_i の大きさに応じて並列発電機の出力を変えることにより、吸収するものとするれば、各発電機が分担すべき燃料の増分は次のようになる。

$$\Delta C_i^g = \Delta C^g \times \frac{\Delta q_i}{\sum \Delta q_i} \quad \dots\dots\dots (5)$$

なお、 ΔC^g が負の場合は、平均運転余力は最低出力までの差分とし、減少可能な燃料 Δq_i を求め、(5)式から ΔC_i^g を求めることになる。

(2) **λ逆数比案分法(処理法b)** 火力発電機間の経済的負担配分は等増分燃料費の原則(等λ法)を基礎としており、一般に、λの低い発電機には、相対的に多くの負担を分担させるのが経済的である。従って、グループ毎の燃料消費量と目標値の間の差分を解消すべく発電機の出力を経済的に修正する方法として、次のλの逆数比によって、(4)式の差分 ΔC^g を各発電機に割り付けるものとする。

$$\Delta C_i^g = \Delta C^g \times \frac{1/\lambda_i}{\sum 1/\lambda_i} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 λ_i は並列運転する発電機の単位時間当たりの平均出力に対応した値を採るものとする。なお、 ΔC^g が負の場合は(6)式の $1/\lambda_i$ は λ_i に変え割り付ける。

(3) **発電量比案分法(処理法c)** この方法は、余力比案分法のように燃料換算は行わず、ステップ4までの計画発電量 W_i に応じて出力を増減させ差分 ΔC^g の解消を図るものである。即ち、発電量要求の大きい発電機ほど更

に負担分担を大きくし、経済性を維持しようとするもので、次式により ΔC^g を各発電機に配分する。

$$\Delta C_i^g = \Delta C^g \times \frac{W_i}{\sum W_i} \quad \dots\dots\dots (7)$$

なお、 ΔC^g が負の場合は $1/W_i$ によって案分する。

上述の燃料制約処理法(1)~(3)を、図1の繰返最適化手順に組み込むためには、ステップ5に入る前の運用計画から求まる各発電機の燃料消費量 C_i^g と、(5)~(7)式で与えられる使用燃料の修正量 ΔC_i^g を用いて、次式により発電機毎の燃料消費量制約 E_i^g を定めるとよい。

$$E_i^g = C_i^g + \Delta C_i^g \quad \dots\dots\dots (8)$$

このように、提案手法は、使用燃料の種類毎に発電機をグループ化し、各グループの燃料消費量制約を満足する起動停止計画の決定を可能にしているが、一方で、各発電機に対しては、経済性からみた燃料消費量の目標値を与えることになる。従って、(8)式を用いる本論文の起動停止計画法により、長期運用における燃料制約(グループ制約)をもとに、長期および短期運用における燃料消費量(発電機個別制約)決定の具体的な指針が得られる。

4. 試算例

4.1> モデル系統および運用制約 表1に示す11台の火力系と図3の月間負荷を用いて提案手法の有効性の検証を行った。運用制約としては火力発電機の最小停止時間および最小運転時間を各々8時間と5時間とし、これらは全機について等しいものとした。また運転予備力については、各時間帯において需要の5%以上を維持するものとし、ここでは発電機出力変化速度を考慮しないものとする。なお、週間計画との比較のため、1ヶ月を4週間としている。次に、燃料種別による発電機のグループ化については表2

表1 発電機諸元

Table 1 Characteristic constants of generators

NO.	燃料費特性 (円/h) $F(P) = a + bP + cP^2$			起動費特性 (千円) $FS(t) = x(1 - e^{-yt})$		定格出力 (MW)
	a	b	c	x	y	
1	162720	3016.6	0.6618	1500	0.036169	350
2	158290	3185.8	0.1538	1500	0.036169	600
3	223680	4797.9	1.5959	880	0.076761	350
4	217100	4679.5	1.3920	700	0.054565	350
5	157940	5041.2	0.8506	1500	0.036169	350
6	137260	6700.3	2.5782	768	0.031512	125
7	105240	7152.3	0.6691	1216	0.038806	125
8	213800	4112.6	1.6070	800	0.053796	250
9	164130	6683.6	0.6505	768	0.031512	175
10	181580	6541.2	1.1393	1216	0.038806	175
11	153620	4339.7	0.7109	800	0.053796	250

に示す3種類のケースを考え、各々について月間の燃料消費量制約ET (石炭換算) が与えられるものとした。ケース1は同じ種類の燃料を使う発電機3台に制約がある場合、ケース2は2種類の燃料に制約がある場合を想定して3台のグループ分けを行った場合、またケース3は2種類の燃料制約でグループ内の発電機がいずれも複数台となり、ケース2よりも制約対象発電機が多い場合、を想定している。なお、燃料消費量制約の収束判定は±5%以内とした。

〈4.2〉 シミュレーション結果 前章で述べた各種の燃料制約処理法と表2の発電機グループ化との組み合わせについて、合計9通りの起動停止計画を求めたが、以下、説明の都合上、例えば、グループ化のケース1と処理法aについては、(1-a)、のように表すものとする。

図4には、一例として、燃料制約のない場合(0-0)と(1-a)の起動停止パターンを示している。同図で、燃料制約のある3, 4, 8号機の発電量が増え、逆に制約のない11号機の発電量が減少している様子が見える。なお、5, 6, 7, 9, 10号機は期間中停止となったため、図示していない。

次に、合計9通りの計画について、燃料制約の与えられた発電機の燃料消費量を示したのが図5で、参考のため燃料制約のない場合の燃料消費量も示している。同図から、

図3 月間火力分担負荷曲線

Fig.3 Monthly load curve for thermal units

表2 発電機のグループ化と燃料消費量制約

Table.2 Generator grouping and fuel consumption constraints

ケース	グループ1		グループ2	
	発電機 No.	ET ¹	発電機 No.	ET ²
1	3, 4, 8	25,000 ton	—	—
2	3, 4	12,500 ton	8	12,500 ton
3	1, 2	200,000 ton	6, 7, 9, 10	70,000 ton

(a) 制約なしの場合 (0-0)

(b) 処理法aを用いる場合 (1-a)

図4 月間起動停止パターンの例 (ケース1)

Fig.4 Examples of monthly unit commitment

図5 起動停止計画から得られる発電機の燃料消費量

Fig.5 Fuel consumption of generators obtained by unit commitment

表4 余力比案分法（処理法 a）による計算結果

Table.4 Calculation results by proportional division of power margin

ケース	グループ 1			グループ 2		
	N o.	燃料消費量	(0-0)	N o.	燃料消費量	(0-0)
1	3	2510	1161			
	4	6932	6656			
	8	15004	9991			
	合計	24446	17808			
2	3	2639	1161	8	12950	9991
	4	9262	6656			
	合計	11901	7817		12950	9991
3	1	50309	70100	6	31369	0
	2	152262	142087	7	15324	0
				9	17167	0
				10	8838	0
	合計	202571	212187		72698	0

注：単位はすべて ton。

経済運用からみて、グループ内各発電機の分担すべき燃料消費量が分り、更に、これに基づいて、発電機グループに課せられる燃料消費量制約を満足するために修正すべき各発電機の出力が決定される。

次に、燃料制約の各処理法の比較検討のため、(1-a)での運転費（25.805億円）と計算時間（17秒）を基準として相対評価を行った。また、表4に、各処理法比較の基となる余力比案分法（処理法 a）の燃料消費量の詳細を示している。表中、(0-0) は燃料制約を考慮しない場合の燃料消費量を表す。図6は経済性の比較として、各処理法による月間運用の総運転費（燃料費＋起動費）を示しており、ケース1では処理法によって最大 0.12%、ケース2では 0.07%、またケース3では 1.53%の差が生じている。ただし、ケース3は、燃料制約の無い場合に運転されない発電

図6 運転費の比較（1-a 基準）

Fig.6 Comparison of operating cost

機を燃料制約によって並列運転させるケースに相当し、図1の手法では収束が難いため、ここでは、ステップ5に入った段階でのみ、発電機定格出力時の発電単価による優先順位を一時的に採用してステップ3に戻り、以降は利用率による優先順位に復帰する方法を用いている。

経済性に関する各処理法の比較は、ケース1と2においては各処理法間にほとんど相違は認められなかった。また、ケース3で処理法 a が最も悪い値となっているのは、燃料制約の収束条件±5%の範囲内で、燃料費の高いグループ2の発電機の燃料使用量が他の処理法よりも多かったことによるもので、経済性に関しては基本的に各処理法間には大きな違いはないと考えられる。

また、シミュレーションに要した計算時間を比べてみると図7に示すように、計算時間が、制約燃料の数やグループ化の構成に依存する傾向を示しているといえる。これら3種類の燃料消費量制約処理法の有効性は、一般に、系統負荷、発電機特性あるいは燃料制約の条件によって異なるが、試算例の結果から判断する限り、経済性および計算時間の両面において、処理法間には際だった相違は見られず、グループ化の複雑さや燃料消費に対する制約の度合いの影響に対しても、どの処理法とも比較的安定した収束特性を

図7 計算時間の比較 (1-a 基準)

Fig.7 Comparison of computing time

示していることがわかる。

最後に、文献(1)で示した週間起動停止計画を4週分連結させた場合と、月間起動停止計画との比較を(1-a)について行った結果の一例を表5に示す。ここで、週間計画における各発電機の燃料制約は、無制約運転時の4週分の各週間計画の燃料消費量を参照して、表5のように適宜、発電機毎に制約量として与えている。

表5から、月間計画の計算時間は週間計画連結より多少短くなっている。また、総運転費では約0.13%の違いが見られ、これは、主として各発電機への燃料制約の設定の相違によるものと考えられる。このように表5の結果からも繰返最適化アルゴリズムの拡張性および経済性から見た月間計画策定の意義が理解される。なお、計算にはパーソナルコンピュータ PC-486GR を用いており、本手法は、実用性の面でも有効な計画法となっている。

表5 月間計画と週間計画連結との比較
Table.5 Comparison between monthly schedule and 4 consecutive weekly schedule

起動停止計画	週間計画連結	月間計画
燃料消費量 : ton (制約量)	3号機 2042 (2040)	2510
	4号機 9025 (9340)	6932
	8号機 13364 (13500)	15004
	合計 24431 (24880)	24446 (25000)
総運転費 (十億円)	2.5839	2.5805
計算時間 (秒)	23	17

5. 結言

繰返最適化アルゴリズムに基づいた、火力発電機群の月間起動停止計画法について述べた。発電機グループに燃料制約が課せられる場合に、各発電機の分担すべき燃料消費量を求める燃料処理法を提案し、試算例により、週間計画決定で用いたアルゴリズムの拡張として、容易に月間起動停止計画が求まることを具体的に明らかにした。

文献(1)の週間計画においても述べたように、本手法は厳密な意味で経済的に最適な運用計画を保証するものではないが、運転費算定のベースとなる経済負荷配分における最適解近傍領域の平坦さを考えると、提案手法は、取り扱いの平易さ、計算効率の面からも実用に即した計画法であると考えられる。

筆者等の提案する、起動停止パターンの逐次修正を基礎とする繰返最適化アルゴリズムは、考察期間や系統規模の増大にも柔軟に対応可能な手法であり、今後、定期補修計画を含む年間等の発電計画への適用を検討していく予定である。

(平成7年2月27日受付、同年4月14日再受付)

文 献

- (1) 山城・アッシャー・内山・中村・本間・先崎：「火力発電機群の週間起動停止計画法」，電学論B，1236-1242，vol.114-B，No.12 (平成6-12)
- (2) 砂居・斉藤・豊田：「多時間軸にまたがる電源運用計画」，電気学会電力技術研究会資料，39-48，PE-94-75 (平成6-10)
- (3) E. Handshin & H. Slomski："Unit Commitment in Thermal Power Systems with Long-term Energy Constraints"，IEEE Trans. Power System, 4 (1990-11)

山城 迪 (正員) 1940年11月22日生。1963年3月北海道大学工学部電気工学科卒業。1967年3月同大学大学院工学研究科修士課程修了。1971年4月北見工業大学助教授。1976年6月同教授，現在に至る。1989年同情報処理センター長。工学博士。電力系統工学の研究に従事。IEEE，情報処理学会，日本太陽エネルギー学会，火力原子力発電技術協会会員。

今野 互 (学生員) 1969年8月21日生。1993年3月北見工業大学電気工学科卒業。1995年3月同大学修士課程修了。電力系統工学の研究に従事。現在、北海道電力勤務。

佐藤 正廣 (正員) 1950年1月4日生。1972年3月北海道大学工学部電気工学科卒業。同年4月北海道電力入社。1991年10月同社釧路支店電力部工務課長。1993年8月同社工務部中央給電司令所所長，現在に至る。