火力発電所の定期点検計画策定システム

正員 四郎丸功 (中国電力) 非会員 鈴木清幸 (インテリジェント・テクノロジー)

非会員 藤島裕巳 (インテリジェント・テクノロジー)

Periodical Overhaul Planning System in Electric Power Plants

Isao Shiroumaru, Member (Chugoku Electric Power Co.)

Kiyoyuki Suzuki, Non-Member (Intelligent Technology Inc.)

Hiromi Fujishima, Non-Member (Intelligent Technology Inc.)

Periodical overhaul planning for boilers and turbines in electric power plants has been done on expert's experience to satisfy various constraints hard to be formalized, for instance, legal regulations, the overhaul interval restriction between units, the adjustment strategy in the case of including special events, the daily electric power requirement and so forth. Although its computer processing using the knowledge base approach has been tried, it does not lead to good results because of exaggerated hardware environment, low performance and no assurance of optimality.

Two step approach is proposed based on the categorization of constraints hard to be formalized into "strong constraints" and "weak constraints" in this paper. It replaces non linear integer programming problem corresponding to "strong constraints" to the iteration problem for the combination of integer programming and combinatorial analysis. Consequently it can lead to optimal solution on the fuzzy satisfaction measures within allowable time with PC.

キーワード： 制約緩和、制約条件、制約分類、定期点検、非線形整数計画(NIP)、ファジー満足化法

1. まえがき

最近の火力発電プラントは、大容量化、複雑化が進む中、コンバインド、加圧流動床プラントのような新しい形式の発電方式が採用されている。また、燃料も重油、石炭、LNG等多様化している。一方で、需要は年間では夏場と冬場のピークが高く、日では昼間のピークが高いが、この傾向は年々進んでおり、火力発電プラントの運用は益々複雑になってきている。このような状況の中で法令で定められた火力発電所の定期点検計画の策定は、需要に応じた発電量を確保し、かつ、点検費用を低減する等、各種の競合し合う制約条件を勘案しながら行うべき、重要で、複雑な業務である。

この業務では、年一回5年程度の長期計画を行い、需要量や燃料事情や機器の状況等による発電能力の変動やその他の制約条件の変動に対して、随時、計画変更・調整のためのシミュレーションを行う必要がある。これは、これまで人が過去の実績や経験により行っていたが、多大な時間を要することや、最適計画の定量的な判定ができないこと、

人的なミスが生じ易いこと等の課題があった。

この課題を解決すべく、計画策定のための属人的なルールを知識ベース化してコンピュータ処理を可能とする試みも過去においてなされてきたが、開発および稼働環境の重たさ、高価さ、パフォーマンスの悪さ、最適解の保証等の問題から、未だ、実用されていなかった。

しかしながら、人間によりコンパイルされた浅い知識、即ち、属人的なルールを深い知識である本来の制約条件に立ち返って、制約条件の集合を、非線形整数計画(NIP)で表現し、厳密な解を求めることが可能な集合(強い制約集合)と数式化はできないがその条件を満足するか否かの評価はできる集合(弱い制約集合)に分類し、かつ、お互いにコンフリクトし合う制約間の妥協案を数理的に求めることが可能なファジー満足化手法を結びつけることにより、従来の知識ベースアプローチに頼らずとも、問題解決ができることが分かり、他に類を見ないPCベースの軽量な実用システム化ができ、先の課題を克服することが実証できたので、ここに報告する。

2. 最適化の規範と制約条件

〈2・1〉 **最適化の規範** 計画すべき6カ年の月毎の必要発電量が、与えられると、〈2・2〉で示される制約条件（最適化の条件も含める）を満足する最長のインターバルを各地域の各ボイラ、ガスタービン、蒸気タービン（以下、ユニットと総称する）に対して求める。

〈2・2〉 **制約条件** 考慮されるべき制約条件を以下に示す。但し、最適化の条件も制約条件として統一的に扱う。

- (I) 所与の6年間の月次ベースの必要発電量に対して、それを日次ベースに変換し、不足する量（ $M \cdot \text{日}$ ）を最小にする。
- (II) 各地区の各ボイラの法令の点検不要期間の最大は2年、ガスタービンのそれは2年、蒸気タービンのそれは4年であるので、この範囲で各々を最大にする。
- (III) 各ボイラー、タービンの中で、最後の定期点検の終了日が最遅のものを最も遅くする。
- (IV) 定期点検は以下の地区で重複させない。
但し、新規追加、3つ以上のグループ化が自由にできるようにする。このグループ化された発電所を以下、同一地区の発電所と称する。
・水島／玉島、岩国／下松、新小野田／下関
- (V) 同一地区の発電所内で毎年定期点検があるように分散させる。
- (VI) 同一地区の発電所での定期点検の開始は他ユニット終了後、2週間以上空ける。但し、ここでの2週間は可変とし、負値も許すようにする。
また、異なる地区のユニット間についても、その開始日と終了日の間隔を明示できるものとする。これらを複数指定できるようにする。
- (VII) 定期点検中に正月、盆、5月連休がある場合には、点検期間に各々6日、3日、3日を追加し、計画図の中にもそれが分かるように明記する（図5参照）。特別なイベントを定義し、その期間調整日数、不可能期間を設定し、それを反映できるようにする。また、その影響する範囲（スコープ）も地区／発電所／ユニット毎及び全てに設定できるようにする。
- (VIII) 水島・玉島・岩国・下松・新小野田・下関は7・8・9月（重負荷期）の点検は行わない。
- (IX) 定期点検の開始・終了日は土曜日・日曜日・祝祭日に重ならないようにする。
- (X) 柳井の点検は、10ユニットすべてをシリーズに配置し、その開始日が「月木ルール」（定期点検の終了日が月～水の場合は、次の点検を次の木曜日に、木～日の場合は、次の月曜日にするルール）に従うように、スケジューリングす

る。重負荷期にぶつかれば、手前に配置する。燃焼器点検は柳井特有のもので、本点検の中間にもってくるようにスケジューリングする。また、柳井の水路点検を含めその他の中間点検はマニュアルスケジューリング機能（本点検に優先されること以外は本点検と同じ制約を考慮する）により割り付ける。

3. 定式化

〈3・1〉 **知識工学的アプローチ** 本システムは上述の規範と制約条件に基づいた制約指向型の最適化問題となる。従来は以下に示す制約条件の知識表現を利用した探索ロジック、いわゆる、知識工学的アプローチで解を求めていた。

まず、各ユニットの前回定検日のデータと前述の最適化の規範と制約条件Ⅱから各ユニットの今回の最も望ましい定検開始日が定まる。この中で開始日が一番遅いユニットを選定し、その開始日をガントチャート上に配置すると共に次点及び次次点までをこれが失敗したときの遡り（バックトラック）先の候補として、同時に記憶しておく（この数を可変としておく）。次に、残ったユニットの中で、先ほどと同じように、最も開始日が遅いものを選定し（同様に、そのバックトラック先の候補も幾つか記憶しておく）、制約条件Ⅰ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ、Ⅸを満足するようにガントチャート上に配置する（この一連の処理は知識表現とルールベース機能により比較的容易に実現できる⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾）。また、制約条件Ⅲは必然的に満足される。更に、制約条件Ⅹは柳井発電所特有のルールであり、独立に、ルールベース機能により実現される）。この操作を繰り返してゆく。バックトラックのきっかけは解が求まるか、制約条件より配置をすることが不可能になった時点であり、バックトラック先はそれの一つ以前の候補点である。終了条件は決められた時間あるいは回数をオーバーしたか、もしくは全てを探索し尽くしたときである。この解は複数求められる。何故ならば、前述の制約条件は一部互いにコンフリクトしており、これらを解消するため、適切な数の制約を緩和してやらねばならず、そのパターンが幾つも存在するからである。これらの満足度を測り、その大きさの程度により複数の解を1つに絞り込む。

この知識工学的アプローチでは計画者の知恵（前回の計画と計画の立案ルール）を活用し、高速に解を求めることはできるが、最適なものである保証はないという問題点を有していた。

〈3・2〉 **数理的アプローチ** 〈2・2〉で示した制約式の全てを数式表現し一挙に解を求めることは不可能である。従って、整数計画(IP)⁽⁴⁾の範疇で制約式を数式化でき厳格な解が求められるもの（強い制約）のグループとそれ以外、即ち、数式化が不可能で、制約が満足されているかを判定し、満足されていないければ、満足されるように動かしたり、それが不可能であれば、適切な制約緩和を行い満足される

ようにするもの（弱い制約）のグループに分割して扱うことが必要となる。ここで、最適性に関する制約は一部、非線形性を呈するのが通常で、これらは弱い制約として扱う。また、強い制約を混合非線形整数計画(MINLP)の範疇のものとして、非線形の最適性の制約を強い制約として、分枝限定法を利用して扱うことも可能であるが、今回は、計算時間の短縮化の観点から、NIPにより数式化を行った⁽⁵⁾。強い制約と弱い制約へのグループ化は以下の様になる。但し、柳井に関する制約(X)は特有の一方向的な割当ルールであり、上述の枠組みには準じない。

強い制約： II、III、VI、VIII
 弱い制約： I、IV、V、VII、IX

処理の流れを、図1のように表すことができる。

図1. 処理の流れ

Fig.1. A process flow

具体的には、まず、同一地区の発電所のユニット群を独立に割り付ける問題を解き、その実行可能解（制約を満足する）を幾つか留保し、各地区の実行可能解を組み合わせ、最適な組合せを探すことが求解の流れのベースとなる。更に、同一地区の発電所のユニット群を独立に割り付ける問題は、強い制約に対する以下の定式化がそのベースとなる。

ここで、割り付け対象とする定期点検の回数をN、ある地区のユニットの数をMとする。0かまたは1の値をとる

整数変数 Y_{ij}^k を導入し、次の(1)(2)で定義する。

行列 (Y_{ij}^k) は任意の行、列において1が1回のみ現れ、他は全て0であるような行列である。

$$\sum_{i=1}^M Y_{ij}^k = 1 \quad (j = 1, \dots, M) \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^M Y_{ij}^k = 1 \quad (i = 1, \dots, M) \quad (2)$$

$$(k = 1, \dots, N)$$

また、変数 Y_{ij}^k が、第k回目の点検において、行列 (Y_{ij}^k) のユニットiに対応するi行の中で1を有する列（唯一）が割り付ける順序を示していると考える。ここでの順序は割り付ける開始時間の順序にも対応するので、制約条件VIIは、

$$\sum_{i=1}^M (TI_{ik} Y_{i,j+1}^k - TF_{ik} Y_{ij}^k) \geq I \quad (j = 1, 2, \dots, M-1) \quad (3)$$

と書ける。ここで、Iは空ける間隔（デフォルトは14）を表す。

更に、

$$TF_{ik} = TI_{ik} + t_{ik} \quad (i = 1, \dots, M, k = 1, \dots, N) \quad (4)$$

である。

ここで、

TF_{ik} ; 第k回目の点検におけるユニットiの点検の終了日

TI_{ik} ; 第k回目の点検におけるユニットiの点検の開始日

t_{ik} ; 第k回目の点検におけるユニットiの作業日数

である。

また、制約条件IIは、

$$TI_{i,k+1} \leq TF_{i,k} + d_1 \quad (i \in I_1) \quad (5)$$

$$TI_{i,k+1} \leq TF_{i,k} + d_2 \quad (i \in I_2)$$

と書ける。

ここで、

I_1 ; ボイラー、ガスタービンに対応するユニットの添字の集合

I_2 ; スチームタービンに対応するユニットの添字の集合

d_1 ; 2年に相当する日数（暦日）

d_2 ; 4年に相当する日数（暦日）

である。

更に、制約条件IIIは、

$$TT \leq TF_{iN} \quad (i = 1, \dots, M) \quad (6)$$

$$TT \rightarrow \text{Max.} \quad (7)$$

と書ける。

図2. 点検作業の割り付け
Fig.2. Allocation of overhaul tasks

図2で示したように、ユニットiの第k回目の点検の割り付けは、法令の d_* 日を最大として、他のユニットの開始日と終了日に対して、最小1日の間隔が空くように行われる。

結局、(1)から(7)までの式を解けば良いが、問題は非線形の(3)式である。これは (Y_{ij}^k) が与えられ

ば、線形になり、IPにより解けることで対処できる。しかし、制約条件VIIの一部とVIIIの不可能期間の扱いを考えると、図3で示すように統一した枠組みで対処することが良い。即ち、制約条件VIは、(1)から(3)の代わりに、

$$\begin{aligned} TI_{ik} - TF_{i'k} &\geq l \\ \text{または} \\ TF_{ik} - TI_{i'k} &\leq -l \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{cases} i = 2, \dots, M \\ i' = 1, \dots, i-1 \end{cases}$$

と書くことができる。

これは、変数 TF_{ik} および TI_{ik} の定義域が2つの凸領域に分割されることを意味する。不可能期間の存在も正に凸領域に分割するので、これらをまとめて、各変数の凸の領域を組み合わせ、各々のパターンで求解することになる。

図2のNIPモジュールが各変数の凸領域を組み合わせ、それぞれの実行可能解を求めてくれるものである。

弱い制約に基づいた最適化は2つのステップで行われる。第1は、制約のI、II、IV、Vに対応する多目的最適化で、第2は、制約のVIIの一部とIXに対応する調整である。後者の処理については特に問題を生じせしめないで、以下の前者の処理について述べる。

一般に複数の制約に対応する目的関数を同時に最適化するような問題は多目的最適化問題と呼ばれる。これには非劣解の集合とユーザ選好に基づいたトレードオフ関係から妥協解を求めるやり方と効用関数化といい各目的関数に対する比較可能な効用を定量化し、この総和を最適化するや

り方がある。ここでは後者に属し、各制約の達成度に基づくユーザの満足度を効用として捉えるため、ユーザに自然に受け入れられ、かつ、取り扱いも容易ということで、ファジー満足化手法を適用した。

図3. 変数 TI_{ik} 、 TF_{ik} の凸領域

Fig.3. Convex regions of variables TI_{ik} and TF_{ik}

ファジー満足化手法とは、Nコの目的に対して、次の線形メンバシップ関数 f_i ($i=1, \dots, N$)を考え、意志決定者が評価する最低限達成すべき目的関数値 P_i^0 と理想的な

$$f_i(P_i(x)) = \begin{cases} 1 & ; P_i(x) \leq P_i^* \\ \frac{P_i(x) - P_i^0}{P_i^* - P_i^0} & ; P_i^* < P_i(x) \leq P_i^0 \\ 0 & ; P_i(x) > P_i^0 \end{cases} \quad (9)$$

目的関数値 P_i^* で規定する。これは次の図4を参考にすれ

図4. 線形メンバシップ関数

Fig.4. Linear membership function

ば分かり易い。

このとき関数 $F(x)$ を、最大にする解が最適解と考えられる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

$$F(x) = \min_{i=1, \dots, N} \{f_i(P_i(x))\} \quad (10)$$

また、具体的な $P_i(x)$ は、

$P_1(x)$: (電力不足率) 電力ウインドウで設定した要求電力に対して、供給電力がどれだけ不足しているかを各日付で求め、不足率%を二乗したものの平均値。

$P_2(x)$: (対最大点検間隔率) 法令の点検間隔の最大値に対してどの位の割合になっているのかの平均値。

$P_3(x)$: (地区内平均重複日数) 地区内における点検の重複日数に対する計画対象の点検数による平均値。

$P_4(x)$: (発電所年間無点検率) ある発電所で、どの点検もその終了日が特定の年度内でない場合、その年度は無点検とみなされる。その無点検の数を(発電所のユニット数×全体の年度数)で除して%をとったもの。

と表すことができる。

4. 計算結果と考察

水島発電所3ユニットペア(ボイラーとスチームタービンまたはガスタービンの組み合わせ)、玉島発電所3ユニットペア、岩国発電所2ユニットペア、下松発電所2ユニットペア、柳井発電所10ユニットペア、新小野田発電所2ユニットペア、下関発電所2ユニットペア、三隅発電所1ユニットペアについて、また、地区は(水島、玉島)(岩国、下松)(柳井)(新小野田、下関)(三隅)の5地区として、平成8年度から6カ年の計画を作成した。この結果画面の一部が図5に示されている。この強い制約を処理し、最適解の候補(実行解)を求める計算にはPentiumPro 200Mhz、32MB RAMのPC(OSはWindows95)で約7分40秒を要した。また、このときの弱い制約の処理の一部となるファジー満足化の意味での効用の得点の上位は次の表1の通りであった。

表1 最適解の候補と各評価項目の得点

Table 1. Candidates of optimal solution and their scores to four objectives.

順位	P_1	P_2	P_3	P_4	F
1	100	67	64	93	64
2	100	65	64	93	64
2	100	65	64	93	64
4	100	66	64	93	64
4	100	66	64	90	64
6	100	68	62	90	62
7	100	66	62	93	62
7	100	66	62	93	62

最適解としては第1行のものを選べばよい。このとき電力の充足率は満足といえるが、過密気味のユニット数のため

に、法令の点検間隔、地区内の点検重複日数に於いては不満足となっている。

その他の弱い制約の処理に於いて、例えば、発電所間の点検間隔については、望ましい「全て2週間」では解が求まらないので、強い制約の処理のためのパラメータの値を緩和し、再度解き直してやる。但しこのケースは、当初、「全て2週間」から始まり、結局、水島、玉島地区については、-40日(40日間の重複)、その他の地区では0日まで条件を緩和した結果である。また、重負荷期間についても、水島、玉島地区では8月のみのという結果になった。

5. む す び

本システムによる計画策定を平成9年度以降の計画で実用している。実運用では、計算結果が必ずしも最適とはいえない場合もある。この原因は、制約条件が必ずしも正確に数式化されていないことや、競合する目的関数の最適化手法に人的判断が残っており、人が最適性の観点で具体的なパラメータの値とか項目選択の形で与えるものが、本来の最適計画に導くものと一致していないという点である。

しかし、大まかな計画策定が短時間ででき、しかも定量的評価も可能であることから、制約条件を変更したり、目的関数の評価のためのパラメータ値を変えながら計画策定シミュレーションを繰り返し、最適な計画に絞り込まれることが確認できた。

今後は、実運用を通して得られる経験を基に、更に、優れたシステムとすべく改善をする予定である。

(平成9年3月31日受付、同9年6月17日再受付)

文 献

- (1) 鈴木、土屋：「CIM構築を目指した生産計画エキスパートシステム開発ツール」、日経AI別冊、pp.74~87(1990)
- (2) K.Suzuki, K. Niida & T. Umeda: "Computer-Aided Process Design and Production Scheduling with Knowledge Base", Proceedings of FORCAPD 89, Elsevier(1990)
- (3) 鈴木、土屋：「バッチプロセス用スケジューリングシステム」、システム/制御/情報、Vol.35, No.3, pp.151-158 (1991)
- (4) R. Garfinkel and G. L. Nemhauser, "Integer Programming", Wiley, New York (1972)
- (5) D. B. Birewar and I. E. Grossmann, "Incorporating Scheduling in the Optimal Design of Multi-product Batch Plants", Computers chem. Engng Vol. 13, No. 1/2, pp.141-161 (1989)

Fig.5. A displaying sample of scheduling result

- (6) M. Inuiguchi, H. Ichihashi and H. Tanaka, "Fuzzy programming: a survey of recent developments", in R. Slowinski, and J. Teghem, Eds., *Stochastic versus Fuzzy Approaches to Multiobjective Programming under Uncertainty*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp.45-68 (1990)
- (7) M. Sakawa, "Fuzzy Sets and Interactive Multi objective Optimization", Plenum Press, New York and London (1993)

(非会員) 1952 年 1 月 13 日生まれ。
78 年 3 月京都大学・工学研究科・化学工学専攻・博士課程 2 年中退。同年東洋エンジニアリング(株)、86 年(株)インテリジェントテクノロジー入社。故障診断システム、スケジューリングシステムの開発、ホログラフィックニューラルネットシステムの開発に従事。現在、常務取締役。計測自動制御学会会員、OR 学会会員、情報処理学会会員。

A black and white portrait of Dr. H. H. Kim, a middle-aged man with dark hair and glasses, wearing a dark suit, white shirt, and patterned tie. He is looking directly at the camera with a neutral expression.

(正員) 1944年3月11日生まれ。
2年3月三原工業高校卒業。同年中
電力(株)入社。主に火力発電所の
自動化および情報化システムの開発、
研究に従事。オーム賞、渋沢賞、後藤
孝太郎賞等受賞。現在、火力部専任課
長。技術士(電気電子部門)。計測自
動制御学会会員。

(非会員) 1960年5月15日生まれ。
84年3月電気通信大学・計算機科学科
卒業。同年日本電気ソフトウェア(株)、
85年(株)インテリジェントテクノロジー入社。ル
ールベース処理系の開発、
故障診断システム、スケジューリングシ
ステムの開発、ホログラフィックニューラルネットシステム
の開発に従事。現在、グループマネージャ。