電力需給運用における発電機運転計画作成

河田 謙一，東西田 憲一，榑林 芳之，澤 敏之，小林 康弘，中田 祐司

1．はじめに

電力会社では，顧客に良質な電気を安定して届けるために，それぞれの部門で取り組んでいる．

中でも，中央給電指令所（以下，中給という）では良質で安定した電気を経済的に届けるため，日々の電力需給運用計画を作成しそれにもとづくオンラインでの実運用を担当している．

この電力需給運用計画とは，当社管内で使用される電力使用量すなわち1日の負荷曲線を予測し，それに対応した供給力を準備することである．(図1参照)

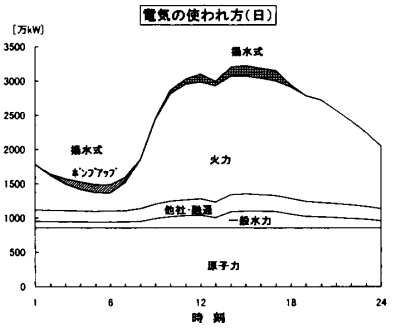


図1　1日の負荷曲線

なお，計画作成において水力・火力・原子力等の各種電源の特徴を活かし経済的な発電となるよう考慮するのはもとより，発電所の運用制約や電力系統における送電線等に流れる電力について，設備運用限度を考慮し決定する必要がある．

各発電所の特徴は，以下のとおりである．

① 原子力：省資源・電源多様化によるエネルギーの安定確保，経済性，環境負荷などの面からもベース供給力として優れており，出力一定を原則とする．

② 一般水力：国内資源の有効活用および環境にも優しい供給力であることから，年間の貯水地運用計画をもとに水系別に発電価値が最大となるように計画を立案する．

③ 他社融通：他社の電源受電の他，電力会社間での広域運用による電力融通であり，会社間での経済的なベース供給力として扱う．

④ 火力発電所：負荷追従性に優れ，中間およびピーク負荷を分担する．昭和57年以降の火力発電所については，起動停止が容易なDSS設計を導入しており，深夜軽負荷時には稼働ユニットの高効率運用を可能とし，総合効率向上に貢献している．

ただし，起動停止については，時間や回数等の制約があり，ユニット別に異なる燃料－出力特性を考慮し，経済的な運転計画作成が必要となる．

⑤ 揚水式水力：深夜等の廉価な電力を水の位置エネルギーの形で蓄え，昼間ピーク時に発電するもので，ピーク供給力として適した電源であるとともに需要の変動に対して，高い追従性を持つ．

ただし，揚水発電の効率は約70%であり，運用については火力運転計画との協調によりトータル燃料費の低減をはかる必要がある．

以上のような各種電源を組み合わせ，想定した需要に対応した経済的な発電所の運転計画を作成することが重要である．ここで計画の対象とする可変供給力は，火力と揚水式発電所とし，ベース供給力となる原子力・一般水力・他社融通は固定供給力として扱う．

2．電力需給運用計画最適化の必要性

火力発電所の起動停止計画の組合せは，指数的に増大するため当社の場合，火力機55ユニットの1時刻断面の組合せは2^{55}と膨大となる．

これまでに需給運用計画の作成手法としては，優先順位法 [1]，知識処理 [2] [3]，動的計画法 [4]～[8]，やラグランジュ緩和法 [9] ～[11] を用いた手

かわた けんいち，としだ のりかず，くればやし よしゆき
関西電力㈱　〒530 大阪市北区中之島3-3-22
さわ としゆき，こばやし やすのり，なかた ゆうじ
㈱日立製作所

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

法が開発されている．

当社でも，従来から固定の優先順位（火力ユニットの最大出力での料費単価の安価な順）を用いて，計画日の最大電力発生時刻と最低電力発生時刻の2断面で需給バランスを満足する並列ユニットを決定し，その間の起動・停止計画については，運用者の経験により決定されていた．しかし，この方法では運用制約を満足し，燃料費を最適化するのは困難であった．

そこで，需給バランス，予備力等の運用制約を満足し，時間毎の電力需要に応じた最適な優先順位と動的計画法を用いて，より経済的な火力発電所と揚水発電所の運用計画を作成できる手法を開発［12］し，中給の計画支援システムとして一部運用を開始しているのでその事例について紹介する．

3．運用計画作成手法

3.1 問題の定義

想定した電力需要に対して，需給バランス，予備力等の運用制約を満足し，各時刻の火力発電所の起動・停止計画と揚水発電所の揚水量および発電量の計画を作成することである．

(1) 目的関数

目的関数Zは，計画期間全体における火力運転費用（燃料費＋起動費の和）であり，式(a)で表わす．

$$Z=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{T}\{u_{ij}F_i(P_{ij})+u_{ij}(1-u_{ij-1})S_i\}\ \cdots\cdots(a)$$

ここで，$F_i(P_{ij})=a_iP_{ij}^2+b_iP_{ij}+c_i$，

F_i　：ユニットiの燃料費関数，

a_i, b_i, c_i：燃料費関数の係数

P_{ij}　：ユニットiの時刻jの出力(MW)

S_i　：ユニットiの起動費

u_{ij}　：ユニットiの時刻jで運転の時1，停止の時0

N　：火力ユニット数

T　：計画期間

(2) 問題の規模

対象とするユニット数は，火力55ユニット，揚水4ユニットであり，需給計画期間は需要予測精度等を考慮し週間および翌日の最大168（24時間×7日）断面である．また，電力設備の潮流チェックについては，500 kV，275kV，および主要154kV系統で実施している．

(3) 制約事項

① 需給バランス：需要と供給の一致．

② 必要予備力：電源脱落が生じても，安定して電力供給できる火力と揚水ユニットの予備力の和．

③ AFC容量：負荷変動に追従するための発電機出力変動可能量．

④ ユニットの起動停止時間：火力ユニットの起動から停止または，停止から起動の間で必要とする最小連続時間．

⑤ 同一中央制御室の同時起動回避：同一中央制御室で制御されるユニットで1つのユニットを起動すると他のユニットはその日の起動は不可の制約発電所．

⑥ DSS(Daily Start Stop)許容回数：設備保全上，年間で決定された回数のうち運用計画の対象期間における許容回数．

⑦ LNG消費計画：LNG基地の容量を考慮して計画対象期間内で消費すべきLNG燃料の量．

⑧ 揚水池水位：揚水池水位の上下限，必要予備力から決定される必要最低水位．

3.2 需給運用計画作成順序

図2のフローで，計画作成条件とは各時刻における想定需要・固定供給力および制約条件・ユニット特性等である．

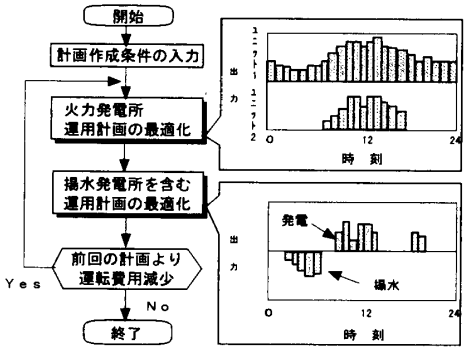


図2　需給運用計画作成フロー

これらの計画作成条件をもとに，火力発電所の運用計画を作成し，次に揚水発電所の運用計画を作成する．火力発電所の運転費用は各時刻で消費する燃料費より計算できる．揚水発電所については，深夜の火力出力で揚水し，この揚水を用いて昼間に発電するため，揚水単価は，火力発電所の運用計画を作成したあとでないと決定できない．

このため，火力と揚水発電所の運用計画を作成したのち，運転費用を評価し，揚水発電所を含む運用計画の方がメリットがあれば，前回ループの火力作成条件を変更して再度作成する．すなわち，このループは2回以上繰り返し実行する．

3.3 火力発電所運用計画作成手法

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

経済的な計画を作成するため各時間ごとの火力ユニットの優先順位を，実際に出力配分される出力帯ごとに増分燃料費（単位出力変化に必要な燃料費）とともに変更し，動的計画法により最適な運用計画を作成する．ただし各時刻の起動停止の全組合せ（発電機ユニット55台で $2^{55} \fallingdotseq 3 \times 10^{16}$）について探索することは，実運用上の計算時間の観点からも困難である．

そこで，最適な優先順位をもとに運転費用が安価となる起動停止計画を絞り込んだのち，動的計画法により運転費用最小となる運用計画を作成することとした．（図3参照）

（DP 1）最適優先順位の決定

各ユニットの増分燃料費から，この値に対する全ユニットの出力を計算し，この出力における燃料費単価を算出し安価な順に並べ替える．増分燃料費の全範囲について計算し，優先順位をテーブルに格納する．

（DP 2）経済的な起動停止計画候補の作成

DP 1の優先順位をもとに火力ユニットを運転したときに，運転ユニットの出力合計が需要と一致し予備力の制約事項を満足する増分燃料費を求める．この増分燃料費における優先順位を最適な優先順位とする．

この優先順位をもとに起動停止計画案を1つ作成する．次にこの計画の中で運転する優先順位の最も低いユニットを基準に，前後の指定台数（ウインドウ）のユニットについて起動停止の組合せを作成する．

このときに，ウインドウ範囲外の優先順位の高いユニットについては運転，優先順位の低いユニットについては停止とする．作成した計画候補のうち予備力，AFC容量等の制約を満足する計画を対象時間の起動停止計画の候補とする．

（DP 3）動的計画法による時間的に連続した運転費用最小の運用計画作成

DP 2で作成した起動停止計画候補の中から時点間にまたがる制約事項を満足する，運転費用最小計画を式(b)の動的計画法［13］を用いて作成する．

$$Z(K,I) = \underset{\{J\}}{\mathrm{Min}}[P_{\mathrm{cost}}(K,I) + S_{\mathrm{cost}}(I,K;J,K-1) + Z(K-1,J)] \quad ① \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (b)$$

$Z(K,I)$：開始時刻から時刻Kの計画候補 Iに至るまでの最小運転費用

$P_{\mathrm{cost}}(K,I)$：時刻Kの計画候補 Iの燃料費

$S_{\mathrm{cost}}(I,K;J,K-1)$：時刻（$K-1$）の計画候補 Jから時刻Kの計画候補 Iに変化するときの起動費

$\{J\}$：時刻$(K-1)$の計画候補の集合

3.4 揚水発電所運用計画作成手法

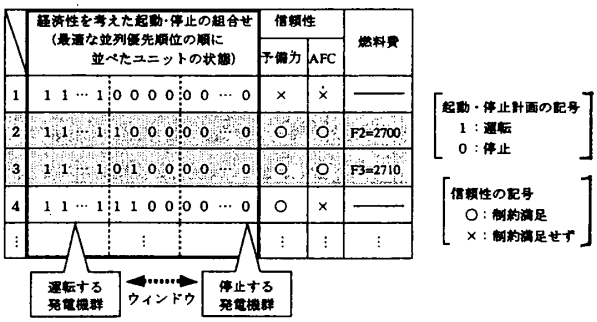
揚水発電所を積極的に利用して，経済的な運用計画を作成する．ここでは，計画期間において運転費用が高いピーク火力（ピーク時間帯で運転するユニット）を停止し，ピーク時間帯の燃料費を低減するとともに，これに必要な揚水の運転費用の増加を最小にする．

揚水発電所の運用計画作成手法は，次の4ステップ

（DP 1）最適優先順位の決定

λ	優先順位	1	2	3	……	51	52	53
3.80 ～ 3.81	名称	多奈川1	南港3	海南1	……	姫－1	三宝1	堺港1
	燃料単価	5.07	5.09	5.11	……	8.58	8.77	19.58
	出力	39	215	161	……	44	39	63
⋮					⋮			
8.49 ～ 8.50	名称	姫二5	姫二6	姫二4	……	姫－2	堺港1	姫－1
	燃料単価	4.60	4.66	4.67	……	7.83	8.38	8.53
	出力	570	570	220	……	75	250	60

（DP 2）経済的な起動停止計画候補の作成



（DP 3）動的計画法による時間的に連続した運転費用最小の運用計画作成

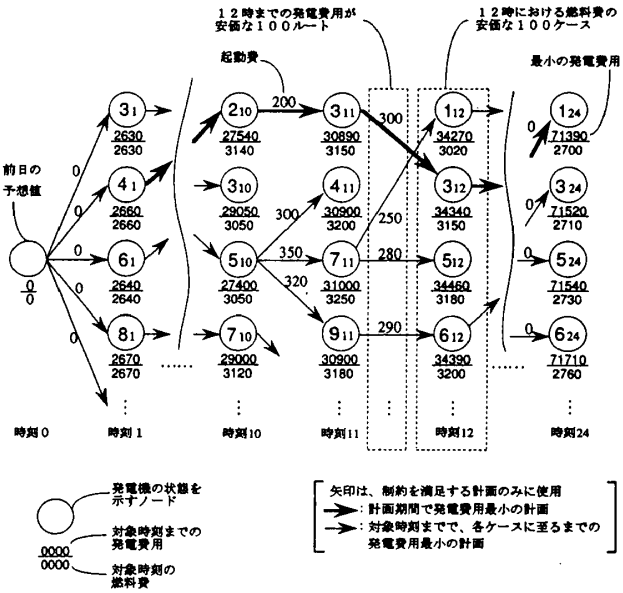


図3　火力発電所運用計画作成フロー

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

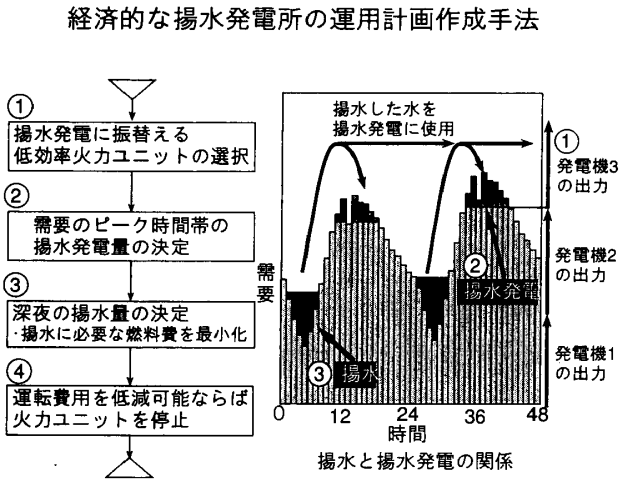


図4　揚水発電所運用計画作成フロー

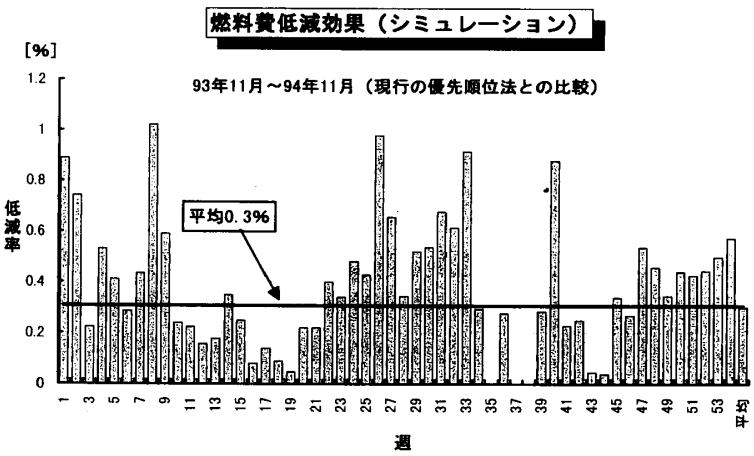


図5　シミュレーション結果

（図4）からなり，ピーク火力を揚水発電に振り替えることで運転費用が低減できる場合は，制約範囲内で起動停止計画を変更する．

4．成　果

シミュレーションによる検証で従来の優先順位法と比較して，年間平均で約0.3%の燃料費低減効果が期待できることが確認できた．（図5参照）

今後は，中給支援システムとしての実運用での効果について評価を実施していきたいと考えている．

参考文献

[1] 大庭靖男，磯田八郎，児玉博明，杉山時雄，西森壽郎：「週間需給運用計画計算システムの開発」，電学論B，77，615～625（昭和58-9）

[2] 天野雅彦，福井千尋，川上潤三，大道祐一「需給計画支援エキスパートシステム」，同上B，110 302～310，(H2—4)

[3] S.K.Tong, S.M.Shahidehpour and Z.Ouyang:" A Heuristic Short-term Unit Commitment", IEEE Trans. Power Syst.,6,No,3, 1210～1217(1991)

[4] C.H.Pang and H.C.Chan:"Optimal Shortterm Thermal Unit Commitment", IEEE Trans.Power Apparatus Syst.,PAS-95,No,4,1336～1346(1976)

[5] C.K.Pang, G.B.Sheble and F.Albuyeh："Evaluation of Dynammic Programming Based Method and Multiple Area Representation For Thermal Unit Commitments", IEEE Trans.Power Apparatus Syst.,PAS-100,No.3,1212～1218(1981)

[6] K.D.Le,J.T.Day,B.L.Cooper and E.W.Gibbon："A Global Optimization Method For Scheduling Thermal Generation, Hydro Generation, and Economy Purchases", IEEE Trans. Power Apparatus Syst.PAS-102, No.7,1986～1993(1983)

[7] W.L.Snyder,jr., H.D.Powell,jr.and J.C. Rayburn："Dynamic Programming Approach to Unit Commitment", IEEE Trans.Power Syst., 2 No.2, 339～350(1987)

[8] Z.Ouyang and S.M.Shahidehpour:"An Intelligent Dynamic Programming For Unit Commitment Application ", IEEE Trans.Power Syst.,6, No.8,1203～1209(1987)

[9] D.P.Bertsekas,G.S.Lauer,N.R.Sandell,jr.and T.A.Posbergh："Optimal Short-Term Scheduling of Large Power System", IEEE Automatic Contrl ,AC-128,No.1,1～11(1983)

[10] A.Merlin and P.Sandrin："A New Method For Unit Commitment at Electric de France", IEEE Trans.Power Apparatus Syst.PAS-102, No.5,1218～1225(1983)

[11] 青木謙一，加藤政一，宮川隆久，石田憲：「揚水発電所を含む系統の最適運用計画」，電気学会電力技術研資，PE-83-16，31～40（昭58）

[12] 澤敏之，木下光夫，中田祐司，吉川元庸，中島宏，樽林芳之：「火力・揚水発電所の運用計画作成手法」，電学論B，114，1220～1226（平成6-12）

[13] Allen J.Wood,Bruce F.Wollenberg : Power Generation,Operation,and Control(1983) John Wiley

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．