ボイラとの協調を考慮した熱併給分散型電源の 最適運用決定手法

学生員 田 村 俊 之 (北海道大)
正 員 北 裕 幸 (北海道大)
正 員 西 谷 健 一 (北海道工大)
正 員 長谷川 淳 (北海道大)

A Method for Determining the Optimal Operation of Dispersed Cogenerating Sources in Coordination with Boilers

Toshiyuki Tamura, Student Member, Hiroyuki Kita, Member (Hokkaido University), Ken-ichi Nishiya, Member (Hokkaido Institute of Technology), Jun Hasegawa, Member (Hokkaido University)

This paper presents a method for determining an optimal operating strategy of dispersed cogenerating sources. When considering only electric power supply, we can determine the optimal operation of these sources easily by the principle of equal incremental fuel cost. However, when these sources undertake thermal supply as well as electric power supply, thermal energy discharged by the generation of electricity has large economical merit. Thus, it is necessary to determine the optimal operation of cogeneration sources, while assessing this merit adequately.

This paper discusses an optimal operation strategy where the thermal merit is assessed quantitatively through Kuhn-Tucker's optimal conditions. Since we can calculate the optimal operation of cogenerating facilities by the proposed method in the same manner as the principle of equal incremental fuel cost, the solution algorithm is simple. Further, it also has an advantage of being able to be applied to parameter analysis, because we can obtain the solution quickly. The effectiveness of the proposed method is ascertained through numerical examples using a model system.

キーワード：電力系統，分散型電源，熱電併給，燃料電池，最適負荷配分

1. ま え が き

電力需要の都市集中化，大容量電源の遠隔化・偏在化などに伴い，電力需要地近傍に設置可能な分散型電源や電力貯蔵装置など，新しい弾力的な電気エネルギー供給形態の研究開発が積極的に進められている⁽¹⁾⁽²⁾。特に，燃料電池発電システム（以下，FCシステムと呼ぶ）は，多種の燃料を使用できるばかりでなく，環境保全性にも優れていることから，都市への設置が可能であり，これに伴って，送電設備が簡略化されるとともに，送電損失の低減を図ることが可能となる。また，発電に伴う排熱を暖冷房などとして地域熱供給などに有効利用することにより，高いエネルギー利用効率を期待できるという側面ももっている⁽³⁾。

ところで，FCシステムを電力事業用として電力系統内に導入する場合，そのコンパクト性，モジュール構造などの特徴から，配電用変電所などへ分散配置されることが考

えられるが，一方で，こうした電源が無秩序に導入・運用された場合，既存の大型電源の運用や設備計画にも影響を与え，全体の経済性および省エネルギー効果をも損なう恐れがある。また，近年の系統連系に関する規制緩和ともあいまって，民間ベースの大規模熱電併給プラントの出現も予想されるが，こうしたシステムにおいても需要地点だけのミクロ的な経済性にとらわれることなく，電力・熱供給システム全体としてのエネルギー有効利用を目的とした，グローバルな運用指針が望まれる。以上のような背景から本論文では，FCシステムが電力および熱供給の一翼を担うべく電力系統内に導入される場合を想定し，経済性の追求，ひいてはエネルギー有効利用の観点から，最も望ましい熱電併給運用方策を与えるための手法について提案する。

電力供給のみを考慮した場合，FCシステムの最適出力は等増分燃料費の法則（等 λ 則）に基づいて容易に決定

することができるが、熱供給をも同時に考慮する際には、排熱にも大きな経済的メリットが存在することになるため、この値を正當に評価したうえでFCシステムの運用を決定する必要がある。提案手法では、FCシステムによる熱供給問題を、従来のボイラによる熱供給システムとの協調問題と考え、いわゆる Kuhn-Tucker 定理に基づく最適条件によって熱の価値を厳密に評価している。これにより、従来の等増分燃料費則と同様の手順で、FCシステムの最適運用パターンが算出されるため、計算アルゴリズムが平易となり、運用解を高速に得ることができるという特徴がある。提案手法の有効性はモデルシステムを用いた数値計算によって示されている。

2. 熱併給分散型電源の最適運用条件

〈2・1〉 最適運用問題の定式化⁽⁴⁾ 本論文では、図1に示すようなエネルギー供給システムを念頭に置き、トータルとしての燃料費が最小となるよう、FCシステムを含む各エネルギー源の運用を決定する方策について検討を行う。すなわち、FCシステムは幾つかの特定の地域（例えば、配電用変電所）に分散配置されており、火力発電所とともに電気エネルギーを供給する。また、各FCシステムは、発電の際に生じる排熱を自地域内の熱負荷に供給するものとし（他地域間の熱エネルギー融通は考慮しない）、ボイラとともに熱供給システムをも構成する。この場合のボイラは、FCシステムのみでは賄うことのできない熱エネルギーを補うためのものであり、十分な熱供給能力をもつものとする。なお、電力主導型の熱負荷については、電力負荷として扱うことで容易に考慮することができる。

このエネルギー供給システムにおける総コストは、発電機、FCシステム、およびボイラの燃料費の総和として与えられ、ある時間断面に対する最適運用問題は、以下のような非線形最適化問題として定式化される。

$$\min f = \sum_{i=1}^{NG} f_{gi}(P_{gi}) + \sum_{j=1}^{NC} f_{cj}(P_{cj}) + \sum_{j=1}^{NC} f_{bj}(H_{bj}) \quad (1)$$

subj. to

$$P_D + P_L - \sum_{i=1}^{NG} P_{gi} - \sum_{j=1}^{NC} P_{cj} = 0 \quad (\text{電力需給バランス条件}) \quad (2)$$

$$H_{Dj} \leq H_{cj}(P_{cj}) + H_{bj} \quad (j \text{ 地点での熱供給条件}) \quad (3)$$

図1 エネルギー供給システム
Fig. 1. Energy supply system.

$$\left. \begin{aligned} P_{gimin} &\leq P_{gi} \leq P_{gimax} \\ P_{cjmin} &\leq P_{cj} \leq P_{cjmax} \end{aligned} \right\} \quad (\text{出力上下制限}) \quad (4)$$

$$H_{bj} \geq 0 \quad (\text{ボイラの非負制約}) \quad (5)$$

ここで、NG, NC: 火力発電機台数および熱供給サイト数、 P_D, P_L : 電力需要および送電損失、 H_{Dj} : 熱需要、 i, j : 火力発電機および熱供給サイト番号、 f_{gi}, P_{gi} : i 番目の火力発電機の燃料費および出力、 f_{cj}, P_{cj}, H_{cj} : j 番目のFCシステムの燃料費、出力および熱出力、 f_{bj}, H_{bj} : j 番目のボイラの燃料費および熱出力、 P_{gimax}, P_{gimin} : i 番目の火力発電機出力の上限値および下限値、 P_{cjmax}, P_{cjmin} : j 番目のFCシステム出力の上限値および下限値

なお、FCシステムは最低出力以上で必ず運用されており、起動・停止は行わないものとする。これは一般に、FCシステムは起動停止に時間を要し、エネルギーロスも大きいことから、頻繁な起動停止には適さず、連続で運転するのが望ましいからである⁽⁵⁾。また、熱需要については低温・高温といった最終需要形態までは考慮に入れず、単に必要なエネルギー量 (Mcal/h) として与えられるものとする。

〈2・2〉 Kuhn-Tucker の定理に基づく最適運用条件⁽⁶⁾

前節の最適化問題に対して、Kuhn-Tucker の最適性条件を用いて、最適解が満足すべき必要条件を導出する。まず、ラグランジュ関数 L を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} L = & \sum_{i=1}^{NG} f_{gi}(P_{gi}) + \sum_{j=1}^{NC} f_{cj}(P_{cj}) + \sum_{j=1}^{NC} f_{bj}(H_{bj}) \\ & + \lambda \left(P_D + P_L - \sum_{i=1}^{NG} P_{gi} - \sum_{j=1}^{NC} P_{cj} \right) \\ & + \mu_j (-H_{cj} - H_{bj} + H_{Dj}) \quad (6) \end{aligned}$$

ただし、式が煩雑になることを避けるため、発電機およびFCシステムの上制約に関するラグランジュ乗数は省略している。

Kuhn-Tucker の最適性条件によれば、最適解においては、以下に示す条件が満足されている必要がある。

$$\frac{\partial L}{\partial P_{gi}} = \frac{df_{gi}}{dP_{gi}} - \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}} \right) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{cj}} = \frac{df_{cj}}{dP_{cj}} - \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{cj}} \right) - \mu_j \frac{dH_{cj}}{dP_{cj}} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial L}{\partial H_{bj}} = \frac{df_{bj}}{dH_{bj}} - \mu_j \geq 0 \quad (9)$$

$$\left(\frac{df_{bj}}{dH_{bj}} - \mu_j \right) H_{bj} = 0 \quad (10)$$

$$H_{Dj} - H_{cj}(P_{cj}) - H_{bj} \leq 0 \quad (11)$$

$$\mu_j \{ H_{Dj} - H_{cj}(P_{cj}) - H_{bj} \} = 0 \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_j &\geq 0, H_{bj} \geq 0 \\ P_{cjmax} &\geq P_{cj} \geq P_{cjmin} \\ P_{gimax} &\geq P_{gi} \geq P_{gimin} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

ここで、(7)式、および(8)式から次式が得られる。

$$\lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}} \right) = \frac{df_{gi}}{dP_{gi}} \quad (14)$$

$$\lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{cj}} \right) = \frac{df_{cj}}{dP_{cj}} - \mu_j \frac{dH_{cj}}{dP_{cj}} \\ = \frac{d}{dP_{cj}} (f_{cj} - \mu_j H_{cj}) \quad \dots\dots\dots (15)$$

(14)式と(15)式を比較すると、(15)式中の $(f_{cj} - \mu_j H_{cj})$ は f_g と同じ意味をもっており、FCシステムの等価的な燃料費を表している。つまり、FCシステムの燃料費は熱供給を考慮することで $\mu_j H_{cj}$ (円/h)だけ減少すると考えることができ、 $\mu_j H_{cj}$ は排熱に対する熱的なメリットを意味している。本論文では、 μ_j (円/Mcal・h)を、単位排熱量当たりの熱の価値を表すものとして「熱等価換算係数」と呼ぶことにする。

また、(9)および(13)式から、 μ_j の値は、

$$0 \leq \mu_j \leq \frac{df_{Bj}}{dH_{Bj}} \quad (=a_j \text{ とする}) \quad \dots\dots\dots (16)$$

の範囲をもつことになるが、その中のいずれの値になるかは、(7)～(13)式から導出される以下の三つのケースによって規定される。

(1) FCシステムの熱出力が熱需要を下回る場合

FCシステムとボイラとで熱需要を賄う場合($H_{Bj} > 0$)であり、FCシステムに対する最適運用条件は、(8)、(10)および(12)式により以下のように表される。

$$\frac{df_{cj}}{dP_{cj}} - \mu_j \frac{dH_{cj}}{dP_{cj}} = \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{cj}} \right) \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\mu_j = \frac{df_{Bj}}{dH_{Bj}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$H_{Dj} - H_{cj}(P_{cj}) - H_{Bj} = 0 \quad \dots\dots\dots (19)$$

(16)、(18)式より、この場合は熱等価換算係数 μ_j が最大、つまり熱によるメリットが最大となる状態であると理解できる。また、FCシステムの増分燃料費は、(17)式左辺で表されるように、熱等価換算係数を含むかたちとなっている。FCシステムの出力は、この修正された増分燃料費を用いることにより、火力発電機とともに等増分燃料費則に従って決定される。なお、 $H_{Bj} > 0$ および(19)式より、このときのFCシステムからの熱出力は、熱需要よりも小さくなる。

(2) FCシステムの熱出力が熱需要に一致する場合

このケースではボイラは運転されず($H_{Bj} = 0$)、FCシステムのみで熱需要を賄っている。各火力発電機およびFCシステムの電力出力は、(7)、(8)式から等増分燃料費則に基づいて算出されるが、その際には、FCシステムの熱出力が熱需要と一致するように、 μ_j ($0 < \mu_j < df_{Bj}/dH_{Bj}$)が決定される。

(3) FCシステムの熱出力が熱需要を上回る場合

このケースでは、熱需要が小さいにもかかわらず、FCシステムがそれ以上の熱出力状態で運転されており、明らかに熱供給によるメリットを無視した状態であると考えられる。この場合は、(12)式から熱等価換算係数 μ_j の値は零となるため、FCシステムの増分燃料費は次式のように表される。

$$\frac{df_{cj}}{dP_{cj}} = \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{cj}} \right) \quad \dots\dots\dots (20)$$

従って、FCシステムの出力は、各火力発電機と同様に、通常の等増分燃料費則によって決定される。

3. 提案する最適運用決定手法

前章で述べた最適条件を満たすように、火力発電機およびFCシステムの出力を見いだすことによって、熱電併給システムの最経済運用が決定される。ところで、熱等価換算係数 μ_j の値が事前に与えられていれば、FCシステムの燃料費を $f_{cj} - \mu_j H_{cj}$ と考えることで、従来の等増分燃料費則に基づいて火力発電機およびFCシステムの出力配分を容易に決定することができる。しかしながら、 μ_j の最適値は計算が終了するまで未知であり、何らかの方法でこの値を算定する必要がある。ここでは、 μ_j の値がFCシステムの熱出力と熱需要との関係に依存して決まるという、前章で述べた性質を利用し、適切に最適運用方策を決定する手法について提案する。

〈3・1〉 等増分燃料費則を拡張した最適運用の決定

いま、火力発電機、およびFCシステムの燃料費特性は、以下のように出力の二次関数になっているものと仮定する。

$$f_{gi}(P_{gi}) = a_i P_{gi}^2 + b_i P_{gi} + c_i \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$f_{cj}(P_{cj}) = a_j P_{cj}^2 + b_j P_{cj} + c_j \quad \dots\dots\dots (22)$$

また、FCシステムの電力出力と熱出力との間に、次のような線形関係が成り立っているものと仮定する⁽⁹⁾。

$$H_{cj} = d_j P_{cj} + e_j \quad \dots\dots\dots (23)$$

(7)、(21)式より任意の火力発電機*i*に対して(24)式が、更に(8)、(22)式より任意のFCシステム*j*に対して(25)式が得られる。

$$P_{gi} = \frac{1}{2a_i} \left\{ \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}} \right) - b_i \right\} \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$P_{cj} = \frac{d_j}{2a_j} \mu_j + \frac{1}{2a_j} \left\{ \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{cj}} \right) - b_j \right\} \quad \dots\dots\dots (25)$$

更に、(23)、(25)式より次の(26)式が得られる。

$$H_{cj} = \frac{d_j^2}{2a_j} \mu_j + \frac{d_j}{2a_j} \left\{ \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{cj}} \right) - b_j + \frac{2a_j e_j}{d_j} \right\} \quad \dots\dots\dots (26)$$

この式から、 λ および増分送電損失 $(\partial P_L / \partial P_{cj})$ の値が与えられると、熱出力 H_{cj} が μ_j と線形関係にあることがわか

図 2 $H_{cj} - \mu_j$ 特性
Fig. 2. H_{cj} versus μ_j .

る。この関係を図示したものが図2である。ただし μ_j は、前章で述べたように(16)式を満足しなければならない。よって図2では、 μ_j の値に上下限値が存在する。以上から、分散型電源の熱出力と熱等価換算係数は、必ず図2の太い直線上にあることがいえる。

いま、図2のグラフ上に3種類の熱負荷 (H_{Dja} , H_{Djb} , H_{Djc}) をプロットする。この3種の熱負荷に対して次のような考察を加えることができる。

(a) 熱負荷 H_{Dja} の場合 熱負荷 H_{Dja} は、 $H_{Cj}-\mu_j$ 特性直線 (図2の太い直線部) よりも下にある点である。つまり分散型電源の熱出力が熱負荷を上回るという状況であり、この場合にはボイラの出力は0である。図2より、このときの μ_j の値は0となる。

(b) 熱負荷 H_{Djb} の場合 熱負荷 H_{Djb} は、 $H_{Cj}-\mu_j$ 特性直線上に重なる負荷である。この場合は、熱出力 H_{Cj} が熱負荷に一致するように分散型電源の運転ができる。このとき、図2より、 μ_j の値は $0 < \mu_j < \alpha_j$ の範囲に入ることがわかる。 μ_j の値は(26)式を変形した次式から算出される。

$$\mu_j = \frac{2a_j}{d_j^2} \left[H_{Cj} - \frac{d_j}{2a_j} \left\{ \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{Cj}} \right) - b_j + \frac{2a_j e_j}{d_j} \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (27)$$

(c) 熱負荷 H_{Djc} の場合 熱負荷 H_{Djc} は、 $H_{Cj}-\mu_j$ 特性直線よりも上にある点であり、FCシステムはこの負荷すべてに熱を供給することはできない。つまり、この場合はFCシステムの出力だけでは熱が不足し、その不足分をボイラが負担している。図2より、このときの μ_j は、最大値 α_j をとっていることが読み取れる。

以上の3ケースに分けられた熱出力 H_{Cj} と μ_j の関係は、前章の Kuhn-Tucker 条件から導かれた最適運用条件の3ケースと一致している。すなわち、このグラフを用いることにより、与えられた熱需要に対応する熱等価換算係数 μ_j を一意に算出することが可能となる。 μ_j の値が決定されれば、さきにも述べたように、等 λ 手法と同様の手順を踏むことによって熱併給分散型電源の最適運用パターンを算出することができる。

本章で提案するこの手法は、電力出力しか想定していなかった等 λ 手法を熱エネルギーの併給をも考慮できるように拡張したものである。このような意味から、これを“拡張等 λ 手法”と呼ぶ。

〈3・2〉 最適運用決定アルゴリズム 拡張等 λ 手法による熱併給分散型電源の最適運用決定アルゴリズムを図3に示す。基本的に、従来の等 λ 手法に基づく発電機の最適運用決定アルゴリズムと同じ流れで計算を進めていく。異なるのは、図3のブロック [4] の部分が付加されていることだけである。熱併給分散型電源の熱出力の価値を表すために、ブロック [4] において従来の等 λ 手法にはなかった熱等価換算係数 μ_j を計算することにより、熱電併給に対応している点に、本提案手法の特徴がある。

図3 拡張等 λ 手法による最適運用決定アルゴリズム

Fig.3. Algorithm for determining the optimal operation by expanded equal incremental cost formula.

4. 数値計算例

〈4・1〉 使用モデルの概要 提案する拡張等 λ 手法による最適運用決定アルゴリズムの有効性を検証するため、図4に示す9機46母線の実規模モデルシステムを用いて試算を行った。このシミュレーションでは、熱併給分散型電源として容量3MWのFCシステム (単機容量100kWのFCシステムの30台並列運転) を運用対象とした。FCシステムとボイラの主な使用データを表1に示す。分散型電源の運用地点としては、図4中の母線番号40, 42および43の3箇所を考え、計3台9MWのFCシステムを運用している。また、熱負荷は住宅地域、商業地域およびその混在地域の3パターンを想定しており、それぞれ40, 42および43母線における負荷とした。図5に、各地域の熱負荷とシステム全体の電力負荷を示す。また、計算に際しては、1日24時間を1時間ごとに分けて行い、各1時間断

図 4 9機46母線モデル系統
Fig. 4. 9-machine and 46-node model system.

表 1 使用データ
Table 1. Used data.

FCシステム	燃料費	30 円/kg
	電力出力と熱出力のエネルギー比	$\frac{H_c}{P_c}=1$
	単機容量	100 kW
	使用燃料	メタノール
ボイラ	燃料費	10 円/Mcal

図 6 最適運用時の FC システム熱出力 (住宅地域)
Fig. 6. Thermal output of FC system in optimal operating state (residential area).

図 5 電力需要および熱需要
Fig. 5. Electric power demand and thermal demand.

表 2 最適運用時の μ_j と運用状況
Table 2. Value of μ_j and operating condition.

時間	μ_j	運用状況	時間	μ_j	運用状況
1	0.0	(a)	13	10.0	(c)
2	0.0	(a)	14	10.0	(c)
3	0.0	(a)	15	10.0	(c)
4	0.0	(a)	16	10.0	(c)
5	0.0	(a)	17	10.0	(c)
6	8.1	(b)	18	10.0	(c)
7	10.0	(c)	19	10.0	(c)
8	10.0	(c)	20	10.0	(c)
9	10.0	(c)	21	10.0	(c)
10	10.0	(c)	22	10.0	(c)
11	10.0	(c)	23	10.0	(c)
12	10.0	(c)	24	4.5	(b)

(最大値 $\alpha_j=10$)

運用状況
(a) : FC システムの熱出力が熱需要を上回る
(b) : FC システムの熱出力が熱需要に一致
(c) : 熱出力が足りず、不足分をボイラが負担

面内で負荷は一定とした。

〈4・2〉 提案アルゴリズムを用いた試算 試算結果を図 6、表 2 に示す。ここでは住宅地域のみ示しているが、他の 2 地域 (商業地域・混在地域) についても同様の結果が得られている。

提案手法によって決定された最適運用パターンでは、電力需要・熱需要の両面に着目した最適な運用がなされている。表 2 によると、運転状況が (a) 熱出力が熱需要を上回る場合には熱等価換算係数は 0 となっており、第 2 章で述べた最適運用条件を実際に満たしていることがわかる。また、運用状況が (b)、(c) の場合にも同様に最適運用条件を満足していることが確認できる。また図 6 によると、

1～5 時では熱需要よりも FC システム熱出力下限値のほうが大きいにもかかわらず、熱出力は下限値に張り付かず下限値よりも大きな値をもっている。このように、熱廃棄がある程度大きくなっても FC システムを運転するのは、電力面からのメリットが考慮され、拡張等 λ 手法によりこの運転状況がシステム全体の経済性の観点から有利であると判断されたためである。

図 7 拡張等λ手法による節約率
Fig. 7. Saving rates by expanded equal incremental cost formula.

次に、次式によって定義される節約率を用いて、FC システム導入による効果を調べた。

節約率

$$= \frac{\text{FC システムの導入によって節約されたコスト}}{\text{FC システムを導入しない際のコスト}} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (28)$$

得られた結果を図 7 に示すが、これを図 5 の電力および熱の負荷パターンと対比させて考えることにより、次のことが理解できる。まず、節約率が大きく運用によるメリットが期待できるのは、熱需要の大きな時間帯（7～23 時）であり、更に電力需要の大小によりそれらの効果に若干の違いが現れている。また、熱需要の小さな時間帯（1～6 時、24 時）では、表 2 の μ_j の値からわかるように、熱供給によるメリットはほとんど、あるいは全く期待できなくなるが、電力供給面でのメリットが存在することから電力需要が大きい時間帯で節約率の低下が抑制されている。このように FC システムの導入効果は、熱需要および電力需要の大きさに密接に関連し、本試算では特に熱供給面でのメリットが強く影響を及ぼしていると考えられる。なお、ここでは FC システムの燃料費を比較的高めに設定したため、節約率は熱供給および電力供給のいずれのメリットも十分に期待できる時間帯のみで正の値となっている。しかしながら、将来的に燃料費の改善がなされ、また全時間帯にわたり十分な熱需要がある地域で FC システムを運用することとすれば、導入による経済的なメリットは更に大きくなっていくものと予想される。

なお、計算には EWS(HP Apollo 9000/755 : 124 MIPS) を用い、計算時間は各 1 時間断面当たり 0.1 秒程度であった。

＜4・3＞ 他の運用方策との比較 拡張等λ手法を用いた方策による経済性の向上を確認するために、以下のような運用方策を想定して比較を行った。比較に際しては、前節で定義した節約率を用いることとする。

〔比較する運用方策〕

(1) 拡張等λ手法による運用方策 本論文で提案する運用決定法である。

(2) 従来の等λ手法による運用方策 この方策は、拡張等λ手法の中で重要な役割を果たす μ_j の値を強制的

図 8 各運用方策による節約率
Fig. 8. Saving rates by each operating strategy.

に 0 とおいたものである。つまり、電力出力のみに着目して FC システムの運用を決定している。

(3) 熱需要追従方策 熱負荷に熱を供給することのみ着目して FC システムの運用を行う。つまり、電力出力を単に付随的なものとして扱う。

(4) FC システム MAXIMUM 運用 この方策では FC システムの出力を上限値 (3 MW) に固定して運用を行う。

各運用方策を節約率を用いて比較したものが図 8 である。本論文で提案した“拡張等λ手法による運用方策”の節約率が、全時間帯で他の方策よりも高くなっていることが読み取れる。このことは、提案手法に基づく運用パターンが最適方策を与えるものであるということを間接的に示している。2 番目に良い結果が得られたのは“熱需要追従方策”であった。“MAXIMUM 運用”でも熱需要の大きい 8～20 時の間は比較的良い運用パターンが得られるが、熱需要の少ない時間帯に入ると急激に悪化する。“従来の等λ手法による運用方策”では、熱需要の少ない時間帯ではあまり気にならないが、熱需要の多い時間帯に入っても、節約率の伸びは小さい。

5. あとがき

本論文では、熱供給分散型電源の経済運用に関して検討を行った。具体的には、分散型電源が、既存のボイラと協調して熱の供給をも行うようなシステムを念頭に置き、その際の最適運用方策を決定するための新しい手法を提案した。提案手法では、まず、Kuhn-Tucker の最適条件に基づいて、熱の価値を定量的に評価することのできる熱等価換算係数 μ_j の導出を行った。更に、この μ_j の値が熱需要の大きさに依存して一意に決定されることに着目し、等λ手法に基づく最経済負荷配分と同様の手順で、最適運用パターンを算出可能とした。この手法を用いることにより、等λ手法と同様、高速に最適運用パターンを得ることができる。そのため、例えば、様々なパラメータ解析に基づく導入計画問題などへの応用も考えられよう。

ところで、提案手法では、FC システムの電力出力と熱出力との間に線形関係があることを前提としているが、この関係が成立しない場合においても、線形近似を用いて、

繰り返し本手法を適応することにより、様々な出力特性をもつFCシステムにも対応することが可能となろう。また、今回は主に、FCシステムについての検討を行ったが、ガスタービンエンジンなど⁽⁷⁾の、他の様々な特性をもつ熱併給分散型電源に対しても検討が必要である。

(平成6年2月28日受付, 同6年4月28日再受付)

文 献

- (1) 豊田:「都市の電力供給システムと電力貯蔵設備」, エネルギー・資源学誌, 14, No. 2, 185 (平4)
- (2) 前出・大山:「分散型電源・新料金制の導入を考慮した電源計画」, 平5電気学会電力・エネルギー部門大会(論文I), No. 22
- (3) 小澤・野崎:燃料電池とその応用(昭56)オーム社
- (4) 田村, 他:「電力系統における熱併給分散型電源の経済運用に関する研究」, 電気学会電力技術研資, PE-93-177 (平5)
- (5) 燃料電池発電システム編集委員会編:燃料電池発電システム(平4)オーム社
- (6) 芳賀, 他:「経済性の観点に基づく電力系統内分散型電源の最適配置」, 平4電気学会電力・エネルギー部門大会(論文I), No. 16
- (7) 伊東・横山:コージェネレーションの最適計画(平2)産業図書

田村 俊之 (学生員) 1969年10月22日生。1993年3月北海道大学工学部電気工学科卒業。同大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程進学, 現在に至る。主として, 電力系統運用・計画に関する研究に従事。

北 裕幸 (正員) 1963年5月7日生。1988年3月北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月同博士課程進学。1989年4月同大学工学部電気工学科助手となり, 現在に至る。工学博士。主として, 電力系統の解析・制御に関する研究に従事。

西谷 健一 (正員) 1947年2月11日生。1969年3月北海道大学理学部物理学科卒業。同年4月同大学工学部電気工学科助手, 同助教授を経て, 1991年4月北海道工業大学電気工学科教授, 現在に至る。工学博士。電力系統工学, 特に電力系統状態推定, 解析および運用・計画に関する研究に従事。システム制御情報学会, エネルギー・資源学会会員。

長谷川 淳 (正員) 1943年12月13日生。1971年3月北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月同大学工学部講師, 同助教授を経て, 1985年4月同教授, 現在に至る。工学博士。主として, 電力系統の計画・運用・制御・解析, およびエネルギー貯蔵に関する研究に従事。IEEE, 日本OR学会, 照明学会, エネルギー・資源学会, 低温工学協会会員。