

■ 研究論文 ■

コジェネ分散型電源導入に与えるエネルギー効率の影響

The Effects of Energy Efficiency of Decentralized Power Station on its Market Penetration

秋澤 淳*・浅野 浩志**・茅 陽一***

Atsushi Akisawa Hiroshi Asano Yoichi Kaya

(1994年9月9日原稿受理)

Abstract

Co-generation is expected to be installed increasingly as a type of decentralized power station in the future. As its market share grows, decentralized and centralized power stations will influence each other depending upon the amount and price of electricity purchased by the former from the latter. This study focuses on the interaction between two different types of power stations and aims at analyzing equilibrium solution depending on the energy efficiency of co-generation. To express the interaction, we assume the decentralized power station is operated from the viewpoint of minimizing the cost, that is, the sum of fixed cost, fuel cost and the cost of electricity purchased from the centralized power station. On the other hand, the centralized power station is considered to supply electricity to both the customers with the decentralized power station and ordinary customers.

In this study, the interaction process is modeled in two ways. One is to model the process under flat rate pricing of electricity and the other under time-of-use-pricing with two periods. Numerical analyses clarify that there exists a critical value of energy efficiency. If the efficiency of co-generation is larger than this the decentralized power station can be introduced into the market. Sensitivity analyses are also shown on the cost of the decentralized power plant and the rate ratio of peak price to off-peak price of electricity. High rate ratio is expected to suppress the capacity of the decentralized power station because its operation mode changes depending on the off-peak price.

1. はじめに

コジェネレーション(以下コジェネ)は省エネルギーのための有力な方策の一つと期待され、近年、工場など産業用のみならず都市部の業務用として導入が進みつつある。一方、既存の電力会社に対して電力を卸売りする発電事業や、自家発電力の一般家庭や事業所に対する小売を解禁にする方向性も打ち出されている。これらの電力事業への参入規制の緩和はますますコジェネの導入を促進すると予想される。

将来コジェネが大量導入された場合、電力市場は従来の集中型電源とコジェネなどの分散型電源で構成されることになる。現在のようにコジェネの導入量が相

対的に非常に小さいうちは、コジェネは集中型電源の規模や運用に対してほとんど影響を与えないと考えられるが、やがてコジェネの比率が高まるにしたがってコジェネの行動が集中型電源に影響を及ぼすと考えられる。したがって、相互に干渉しあう結果として、分散型電源と集中型電源の構成が決まることになる。

従来、分散型電源と集中型電源との関係についての研究は、将来需要の不確実性に対する柔軟性という観点から森ら¹⁾、松橋ら²⁾によってなされている。また、両者の運用に関して浅野³⁾はゲーム論的立場から分析している。本研究では分散型電源と集中型電源の需要分布形状を直接考慮している点が特徴である。森らは日負荷曲線を用いて電源構成を分析することによって

* 東京大学大学院電気工学専攻博士課程

** " 工学部地球環境工学講座助教授

*** 東京大学工学部電気工学科教授

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

負荷分布を考慮しているが、両者間での相互干渉を明示的には取り扱っていない。一方、浅野は運用面のみを扱い電源規模に関する分析は行っていないが、本研究では相互干渉の結果から電源規模を算出している。

本研究では、両者間に働く相互干渉過程をモデル化し、コジエ分散型電源と従来の集中型電源の構成を導くとともに、その均衡状態に及ぼすパラメータの影響を分析することを目的とした。さらに、将来的な時間帯別料金制の普及を視野に入れ、2時間帯モデルによって料金制がコジエ導入に与える影響を導く。

2. 分散型電源と集中型電源の相互作用

分散型電源は自己の評価基準（電力供給コストの最小化）を満たすように行動すると想定できる。言い替えば、供給コストが最小になるように電源規模および集中型電源からの買電量を決定する。この時、分散型電源の規模の設定によって集中型電源からの買電量が変化するため、分散型電源の行動は集中型電源に対する負荷分布に影響し、集中型電源の規模設定を変化させる。集中型電源の規模は設備コストを通じて電力価格に反映されるため、分散型電源の買電に影響を与え、分散型電源の規模決定を変動させる。したがって、両者の行動が均衡する点において電源構成が定まると考えてよい。この相互の干渉過程を図-1に示す。なお、ここでは電力会社が従来通り供給義務を負い、集中型電源はLOLP（負荷損失確率）がある一定値になるように規模が決められると想定している。また、分散型電源からの逆潮流はないものとする。

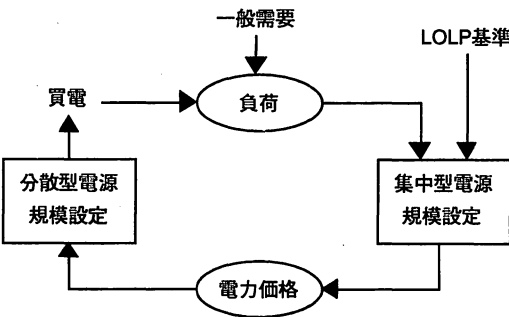


図-1 分散型電源と集中型電源との相互干渉プロセス

以下では、まず、分散型電源と集中型電源の間に働くこの相互干渉プロセスを均一料金の場合について定式化し、その均衡解を導く。次いで、2時間帯モデルに拡張する。

3. 均一料金モデル

3.1 モデル化の前提条件

電力需要として分散型電源が主に賄う需要とそれ以外の一般の需要を想定する。また、それぞれは相関を持つ正規分布で表現されると仮定する。

ここで用いる変数を以下のとおり定義する。

x : 分散型電源の需要, y : 一般の需要,

z : 集中型電源の負荷,

f(x,y) : xとyの同時確率密度関数(2次元正規分布),

g(x) : xの確率密度関数(正規分布),

q(z) : zの確率密度関数,

μ : 平均, σ : 標準偏差 (cはxまたはy),

K_c : 分散型電源の規模, K_u : 集中型電源の規模,

F_x : 分散型電源の燃料消費量,

E_x : 分散型電源買電量, E_u : 集中型電源発電量,

P : 電力価格, T : 8760時間,

γ : 設備費, λ : 燃料費, η : 発電効率

(cはc:分散型電源, u:集中型電源)

3.2 コジエ分散型電源の挙動

分散型電源は与えられた電力価格の下で供給コストを最小にするよう電源規模を決定する。すなわち、評価基準は次式のように表される。

$$J = \gamma_c K_c + \lambda_c F_x + P E_x \rightarrow \text{Min.} \quad \dots (1)$$

ただし、

$$F_x = \frac{T}{\eta_c} \left\{ \int_{-\infty}^{K_c} x g(x) dx + K_c \int_{K_c}^{\infty} g(x) dx \right\} \quad \dots (2)$$

$$E_x = T \int_{K_c}^{\infty} (x - K_c) g(x) dx \quad \dots (3)$$

最適な分散型電源規模は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{dJ}{dK_c} &= \gamma_c + \lambda_c \frac{dF_x}{dK_c} + P \frac{dE_x}{dK_c} \\ &= \gamma_c + \left[\frac{\lambda_c}{\eta_c} - P \right] T \int_{K_c}^{\infty} g(x) dx = 0 \quad \dots (4) \end{aligned}$$

$$\therefore \int_{K_c}^{\infty} g(x) dx = \frac{\eta_c \gamma_c}{(P \eta_c - \lambda_c) T} \quad \dots (5)$$

(4)式から $P > \lambda_c / \eta_c$ であることがわかるので、Jの2回微分が正となることを確認できる。すなわち(5)式のK_cは最小値を与える。(5)式の左辺は分散型電源の規模K_cを超える負荷の発生比率、すなわち負荷損失確率LOLPを意味する。したがって、分散型電源の

LOLPを右辺値に合わせるように電源規模 K_c を設定する。

3.3 集中型電源の挙動

集中型電源は一般の需要と分散型電源が賄い切れない負荷、すなわち K_c を超える分の負荷に対して供給を行い、LOLP基準に基づいて設備規模を決定する。そこで、まず集中型電源の負荷分布を求め、電源規模および電力価格を導く。

(1) 集中型電源の負荷分布

集中型電源に対する負荷 z は分散型電源の需要レベルに応じて次の2通りとなる。

$$z = \begin{cases} y & (x \leq K_c) \\ x + y - K_c & (x > K_c) \end{cases} \quad \dots (6)$$

この時、 z の確率密度分布は次式で求められる。

$$q(z) = \int_{-\infty}^{K_c} f(x, z) dx + \int_{K_c}^{\infty} f(x, z - x + K_c) dx \quad \dots (7)$$

ここで、 $f(x, y)$ として2次元正規確率分布を仮定する。(7)式を展開し次式の集中型電源の負荷分布を得る。

$$q(z) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(z-\mu_z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \times \left[1 - \text{Erf}\left[\frac{r\sigma_x(z-\mu_x) + \sigma_x(\mu_x - K_c)}{\sigma_x\sigma_y\sqrt{2(1-r^2)}}\right] \right] + \frac{1}{2\sqrt{2\pi}(\sigma_x^2 + 2r\sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2)} \times \exp\left[-\frac{(z + K_c - \mu_x - \mu_y)^2}{2(\sigma_x^2 + 2r\sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2)}\right] \times \left[1 + \text{Erf}\left[\frac{\sigma_x(\sigma_x + r\sigma_y)(z - \mu_x) + \sigma_x(\sigma_x + r\sigma_y)(\mu_x - K_c)}{\sigma_x\sigma_y\sqrt{2(1-r^2)}(\sigma_x^2 + 2r\sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2)}\right] \right] \quad \dots (8)$$

ただし、

$$\text{Erf}[x] = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du \quad \dots (9)$$

(2) 集中型電源の規模

集中型電源の規模 K_c は所与のLOLP基準に基づいて決定する。すなわち、

$$\int_{K_c}^{\infty} q(z) dz = \text{LOLP} \quad \dots (10)$$

この時、kWhあたり電力価格は次式で求められる。

$$P = \frac{\gamma_u K_u}{E_u} + \frac{\lambda_u}{\eta_u} \quad \dots (11)$$

ただし、

$$E_u = T \int_{-\infty}^{K_u} zq(z) dz \quad \dots (12)$$

4. 均衡解 -均一料金制の場合-

4.1 入力データ

電力需要および電源設備コスト等のパラメータについては表1に示す数値を用いた。

表1 入力データ

| パラメータ | 分散型電源 | 集中型電源 |
|---------------|------------------|-------|
| 設備建設費 (万円/kW) | 40 ^{注1} | 30 |
| 燃料費 (円/Mcal) | 3 | 1.3 |
| 年経費率 (%) | 16 | 16 |
| 発電効率 (-) | 注2 | 0.35 |
| LOLP (%) | 注3 | 1 |
| 需要平均 (MW) | 100 | 300 |
| 需要標準偏差 (MW) | 20 | 100 |
| 相関係数 | 0.8 | |

- 注：1) ベースケースの設定値。感度分析を行う。
- 2) 感度分析する。分散型電源の発電効率は(3)式で定義されたもの。
- 3) 分散型電源のLOLPは計算の結果決まる。

4.2 均衡解の導出

(1) 分散型電源の効率の影響

分散型電源における K_c と P の関係を、分散型電源の発電効率をパラメータにして図-2に示した。また、併せて集中型電源における K_c と P の関係も図示した。分散型電源では発電効率が高くなるほど電力価格が低下する。これは効率改善により低い価格でも市場に参入可能となることを意味する。一方、集中型電源では K_c が増大するとピーク負荷の削減よりも発電量の低減が卓越するために電力価格は増加傾向を示す。この両者が交わる点で分散型電源の導入量が定まる。なお、発電効率を上げるのは分散型電源がコージェネとして運用されている状況を模擬するためである。以下における分散型電源の発電効率は、次式で換算された排熱を利用した場合の発電効率を意味する。

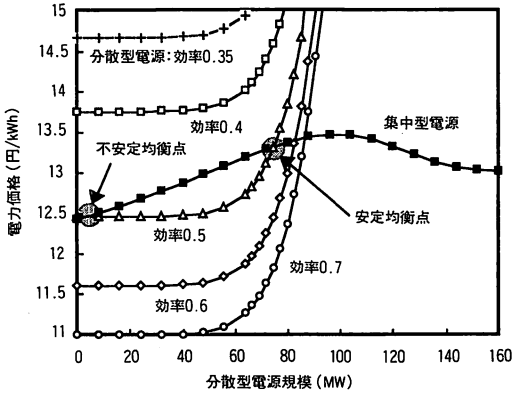


図-2 均一料金モデルによる均衡解

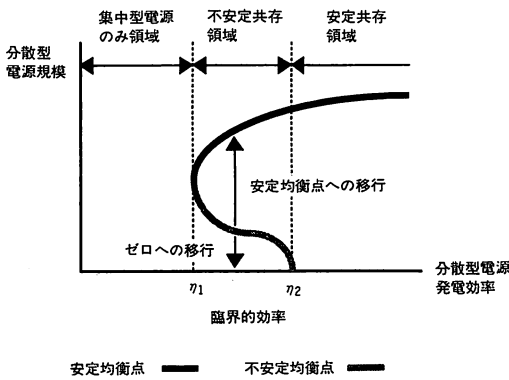


図-3 分散型電源発電効率に対する均衡解の変化

$$\eta = \frac{\eta_b}{\eta_b - \alpha \eta_y} \eta_c \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad \dots (13)$$

ただし、 η_b : ボイラ効率、 η_y : コージェネ熱供給効率、 α : コージェネ排熱の有効利用率
 例えば、 η_b を0.9、 η_y を0.45、 η_c を0.35とすれば、 η は最大で0.7となる。

図より、分散型電源が発電のみの場合（効率0.35の場合）には両者の均衡解がないことがわかる。すなわち、分散型電源は立地せず、すべて集中型電源で賄われることを意味する。一方、分散型電源がコージェネとして運用され、ある臨界的な効率以上になった時に初めて分散型電源が立地可能となる。すなわち、コージェネ分散型電源の効率は電源構成に対して本質的な影響を与える。

(2) 均衡点の性質

図-2によれば、均衡解の特性から分散型電源の効率には2つの転換点がある。低位の臨界的な効率から高位

の臨界的な効率までの範囲では、安定な均衡点と不安定な均衡点がそれぞれ1個ずつ存在し、高位の効率以上の範囲では安定な均衡点1個のみになる。分散型電源の発電効率に対する均衡点の変化の様子を模式的に図-3に示した。コージェネとして高効率で運用されれば安定な均衡点だけになることは、コージェネの社会的効用が大きいという解釈から納得がいく挙動である。

不安定な均衡点は外部条件などの変化によって均衡点からずれ、安定点またはゼロへと移動すると予想される。言い替えれば、何らかの支援的な外部要因（例えば政府の助成）により安定均衡点へと移行する（分散型電源の導入量が拡大する）一方、阻害的な外部要因（例えば電力会社の競争的価格設定）により市場から追い出されると考えられる。このことから、分散型電源の導入状況が安定的か不安定的かによって政策が異なってくると解釈できる。

4.3 感度分析

(1) 分散型電源の需要平均値の影響

表1の設定では分散型電源の需要平均値が一般の需要の平均値に比べて1/3と、比較的分散型電源が多く導入されている状態を想定した。この点是不確定な要素なので、平均値を30, 60, 100 (MW)として均衡解を求めた。なお、標準偏差は平均に対する比が一定となるように設定した。その結果を図-4に示す。ただし、縦軸は分散型電源の規模を需要平均値で割った相対値を示す。平均値が異なる場合でも分散型電源の導入規模や臨界的な効率はほとんど変化しない。したがっ

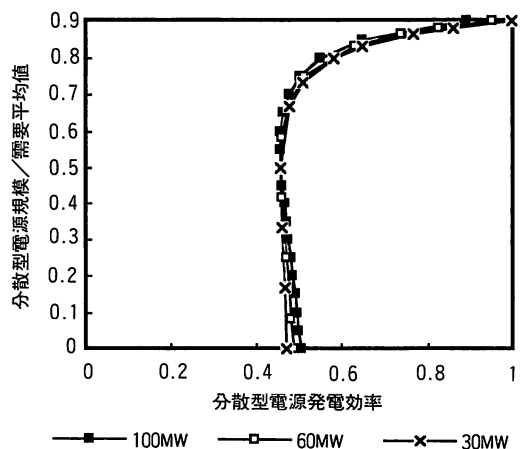


図-4 分散型電源における需要の平均値の導入規模に対する影響

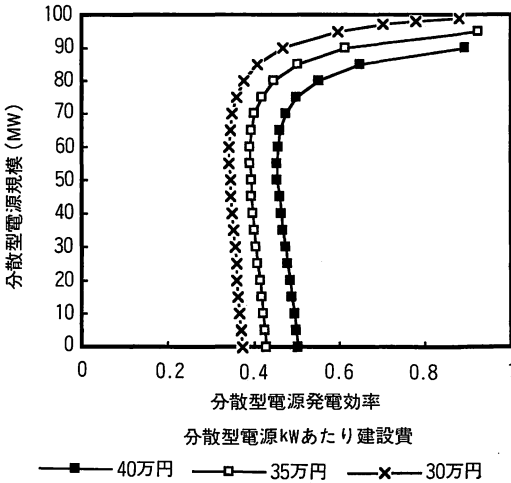


図-5 分散型電源建設費の導入規模に対する影響

て、分散型電源に依存する需要規模によらず導入の条件はほぼ一定とみなしうる。

この数値例における臨界的効率0.5はコジェネの発電排熱の約40%を有効利用する状況を意味し、現状の技術で十分対応可能なレベルである。

(2) 分散型電源の建設費の影響

分散型電源の建設費を30, 35, 40 (万円/kW) とベースケースよりも安くした場合の均衡解の挙動を図-5に示す。建設費が安くなるほど臨界的効率が低下するとともに、安定的均衡解部分の分散型電源規模が大きくなる。したがって、建設費が安いコジェネにとっては不安定領域が低位に移動するため、安定領域での運用が確保しやすいと考えられる。また、分散型電源の建設費が集中型と同程度の場合には、発電効率0.35において均衡解が存在する。言い替えば、コジェネではなく電源として集中型電源と共存が可能となるという点で、建設費低減の効果は大きい。

数値例では、ベースケースでの分散型電源の規模は需要平均値より標準偏差程度下回るところに設定され、かなりの電力を集中型電源から買電する形態をとる。分散型でありながら規模が控え目に算出されるのは、主としてコストに起因すると考えられる。

以上から、従来から定性的に指摘されてきたことであるが、設備建設費および効率は分散型電源(コジェネ)の導入に影響を与える主要な要因であることが定量的に確認できたとともに、その影響は不連続的な結果を与えることが明らかとなった。

5. 2時間帯モデルへの拡張

ここでは先の均一料金制との比較として時間帯別料金制を想定し、均衡解への影響を分析する。

5.1 モデル定式化

オフピーク料金が高いうちは常に分散型電源を運転する方が有利であるが、オフピーク料金が発電のkWhあたり燃料費を下回ればオフピーク時間帯に買電する方が低コストとなる。すなわち、分散型電源の運転モードは、1) ピーク・オフピーク運転モードと、2) ピーク時のみ運転モードの2種類に分かれる。ここでさらに次の記号を定義する。

i : 時間帯添字 ($i=1$: オフピーク, $i=2$: ピーク), r : 料金比 (ピーク料金/オフピーク料金)

時間帯別電力料金についてはピーク時間帯、オフピーク時間帯の長さを等分にとり、次のように設定した。集中型電源の負荷レベル Y_0 をそれ以下の生起確率が0.5となるように設定し、 $z \geq Y_0$ をピーク時間帯、 $z < Y_0$ をオフピーク時間帯とした。なお、年間の負荷持続曲線に基づいて時間帯を分けているため、毎日の時間帯区分が一定ではないことに注意が必要である。

(1) ピーク・オフピーク運転モード(モード1)

1) 分散型電源の挙動

本モードでは、常に分散型電源を運転し、分散型規模を超える負荷についてはその差分を買電で補う。基本的に均一料金モデルと同じ買電形式となる。モード1における分散型電源の評価基準は次式で表される。

$$J = \gamma_c K_c + \lambda_c F_x + \sum_{i=1}^2 P_i E_{ni} \rightarrow \text{Min} \quad \dots (14)$$

ただし、

$$F_x = \frac{T}{\eta_c} \left\{ \int_{-\infty}^{K_c} xg(x)dx + K_c \int_{K_c}^{\infty} g(x) dx \right\} \quad \dots (15)$$

$$E_{x1} = T \int_{K_c}^{\infty} \int_{-\infty}^{K_c+Y_0-x} (x-K_c) f(x,y) dx dy \quad \dots (16)$$

$$E_{x2} = T \int_{K_c}^{\infty} \int_{K_c+Y_0-x}^{\infty} (x-K_c) f(x,y) dx dy \quad \dots (17)$$

これより分散型電源の最適規模は次式で与えられる。

$$\frac{dJ}{dK_c} = \gamma_c + \lambda_c \frac{dF_x}{dK_c} + \sum_{i=1}^2 P_i \frac{dE_{ni}}{dK_c} = 0 \quad \dots (18)$$

$$\therefore \gamma_c + \frac{\lambda_c}{\eta_c} T \int_{K_c}^{\infty} g(x) dx$$

$$\begin{aligned}
 -TP_1 & \left\{ (r-1) \int_{K_c}^{\infty} (x-K_c) f(x, K_c+Y_0-x) dx \right. \\
 & + \int_{K_c}^{\infty} \int_{-\infty}^{K_c+Y_0-x} f(x,y) dx dy \\
 & \left. + r \int_{K_c}^{\infty} \int_{K_c+Y_0-x}^{K_c+Y_0} f(x,y) dx dy \right\} = 0 \quad \dots (19)
 \end{aligned}$$

2) 集中型電源の負荷

モード1における集中型電源の負荷の密度分布は均一料金モデルと同じである。すなわち、

$$q(z) = \int_{-\infty}^{K_c} f(x,y) dx + \int_{K_c}^{\infty} f(x, z-x+K_c) dx \quad \dots (20)$$

(2) ピーク時のみ運転モード (モード2)

1) 分散型電源の挙動

本モードでは、オフピーク時は常に買電し、ピーク時のみ分散型電源を運転する。ここで、 $x > K_c$ の時のピーク時の買電は次の2通りに分かれる。

i) $x+y \geq K_c+Y_0$ のとき

分散型電源は K_c を供給し、不足分を買電する。

ii) $Y_0 \leq x+y < K_c+Y_0$ のとき

集中型電源の負荷が Y_0 になるように分散型電源が供給する。(分散型供給量= $x+y-Y_0$)

後者の場合には分散型の供給を増やすと負荷がピーク時からオフピーク時に移行するため、 $x+y-Y_0$ が供給量の上限となる。モード1と同様に評価基準を設定すれば、モード2における最適規模は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 \gamma_c + \left[\frac{\lambda_c}{\eta_c} - P_2 \right] T \left\{ \int_{K_c}^{\infty} \int_{K_c+Y_0-x}^{\infty} f(x,y) dx dy \right. \\
 \left. + \int_{Y_0-K_c}^{Y_0} (Y_0-y) f(K_c,y) dy \right\} = 0 \quad \dots (21)
 \end{aligned}$$

2) 集中型電源の負荷

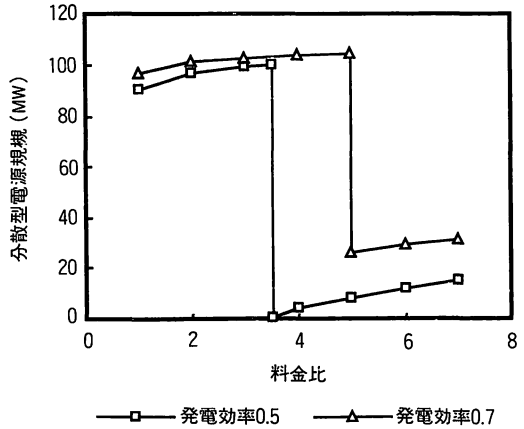
モード2における集中型電源の負荷の密度分布は次式で与えられる。

$z < Y_0$ の時:

$$q(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, z-x) dx + \int_{Y_0-z}^{K_c} f(x, z) dx \quad \dots (22)$$

$z \geq Y_0$ の時:

$$q(z) = \int_{K_c}^{\infty} f(x, z-x+K_c) dx + \int_{-\infty}^{K_c} f(x, z) dx \quad \dots (23)$$



(分散型電源建設費30万円/kWの場合)
 図-6 分散電源の導入規模に対する料金比の影響

5.2 2時間帯モデルによる均衡解

発電効率0.5および0.7のプラントについて料金比を変化させた時の結果を図-6に示す。均一料金の場合(料金比1)から料金比を上げていくに従い、分散型電源規模は増加する傾向を示す。これはコジェネの経済的優位性に基づき、ピーク料金の増大に対応してコスト削減のため分散型電源導入が拡大されることに起因する。一方、料金比の上昇に伴ってオフピーク料金は低下する。 $P_1 = \lambda_c / \eta$ を境としてオフピーク料金が燃料コストを下回れば、オフピーク時は買電が有利となりモード1からモード2への転換が生じる。このため、図-6においてある料金比で分散型電源規模は突然ゼロまたは小さな値にジャンプしている。前述の切り替え条件から発電効率が高いほど低いオフピーク料金までモード1で運転されるので、発電効率0.5では料金比3.5で、発電効率0.7では料金比5でモードの切り替えが発生している。この時のオフピーク料金額としては前者で5.2円/kWhであった。モード2ではピーク時しか分散型電源が運転されないので設備導入の負担が大きくなり、ピーク・オフピークともに運転される場合に比べればコジェネの優位性は小さくなる。したがって、モード2での導入規模は縮小する。それでもピーク料金がさらに増加すれば、コスト削減の誘因が働くため徐々に導入規模は増加する。

以上の時間帯別料金に対する分散型電源の挙動を踏まえれば、高い料金比(低いオフピーク料金)の設定は分散型電源の導入規模を抑制する効果を持つといえる。また、この影響は分散型電源の効率が低いほど大きい。ただし、ここではピーク料金での余剰電力売電

は考慮していない。売電の有無は分散型電源の挙動に大きく影響すると予想される。

6. おわりに

本研究の特徴は分散型電源と集中型電源の相互干渉を明示的に取り扱い、集中型電源の負荷分布が分散型電源の導入規模に依存して変化するものとしてモデル化したことである。今回の均一料金および2時間帯モデルによる分散型電源導入に関する分析の結果、次のことが得られた。

- 分散型電源が導入される上で臨界的な効率が存在する。なお、この臨界的効率は現在のコジェネ技術で十分達成可能と考えられる。
- 分散型電源の建設費の低下が導入規模拡大に効果がある。
- 料金比を高めると分散型電源導入規模が突然ゼロまたは小さくなる分岐的挙動を示す。

従来のコジェネ自家発の分析のように外生的に時間帯区分を与えた場合には、ピーク電力料金に対して連続的に電源規模が大きくなるのに対し、集中型電源との相互干渉を考慮した場合には運転モードの転換が発生する際に急激に分散型電源の規模が縮小された。こ

れは分散型電源の運転状況が時間帯区分にも影響を与えることに起因する。分散型電源と集中型電源の相互干渉をモデル化することにより、条件によっては時間帯別料金制が分散型電源の導入を抑制する影響を持つことが示された。

今回のモデルは静的であるとともに規範的ではない。言い替えれば、電力市場構成を表現したに留まり、分散型電源導入の適正規模の評価には至っていない。この点に関するモデルの拡張⁴⁾や余剰電力の売電を許した場合のモデル化が今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) 森・吉岡：「分散型エネルギーシステムの評価と計画について」, 第9回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集 (1993), 209~214
- 2) 松橋・石谷・林・茅：「不確実な需要の下での電源の最適規模構成」, 電気学会論文誌C, vol.111-C, no.8 (1991), 332~339
- 3) 浅野：「自家発保有需要家向け料金のゲーム論的分析」, 電力中央研究所報告, Y91004 (1991)
- 4) 秋澤, 浅野, 茅：「コジェネ分散型電源と系統発電所との分担に関する分析」, 第10回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集 (1994), 1~6

