

■ 研究論文 ■

限界費用に基づく電力託送料金の設定に関する研究

A Study on Setting the Wheeling Rate of Electricity on the Basis of Marginal Cost

平野大悟*・山地憲治**

Daigo Hirano Kenji Yamaji

(原稿受付1996年4月30日, 受理日10月16日)

Abstract

Under the trend of the deregulation of electric power systems, it is expected that the wheeling transaction of electricity will be actively done in our country.

One of the important questions in the wheeling of electricity is how to set its rate. This paper describes the methodology for setting the wheeling rate based on the marginal cost theory. The problem is first formulated as a nonlinear optimization program for minimizing the operation cost of a given electricity networks; and then, the formulation is extended for the case where the transmission lines are allowed to be added. The applicability of the proposed method is demonstrated with simplified network models.

1. はじめに

近年, 電力市場の自由化は国際的な潮流となりつつある。わが国においても電気事業法が改正され, 発電部門に競争が導入されることになった。本論文で述べる電力託送は, 「電力の需要家と供給者が第三者の送電ネットワークを使って, 電力の取り引きを行うこと」と定義されており, 電力市場自由化の一貫として位置づけられる。

電力託送が行なわれるにあたり, とりわけ重要な論点になるのがその料金設定の問題である。効率的な発電ユニットの市場参入を促進させる意味でも, 非効率的な発電ユニットが市場に参入することで起こり得る弊害を防ぐためにも, 適正な料金の設定は不可欠である。

そこで本論文では, 限界費用原理に基づいた託送料金の設定を試みる。

2. 電力託送料金

以下では簡単のため, 既存の電力会社をwheeler, 託送電力の売り手をseller, 買い手をbuyerとよぶ。

託送料金とは, 電力託送が行われたときに託送の契

約側からwheeler側に支払われる料金である。従来からその設定方法に関して様々な研究がなされてきたが, 総括費用配分手法 (Embedded Costs Method) と限界費用配分手法 (Marginal Costs Method) に大きく分類できる¹⁾。

前者は比較的容易に料金が計算できる利点がある反面, 託送によって変化する運用コスト (燃料費用等) を考慮できない, 新設設備を数値計算上直接的に取り扱うことが困難である, といった欠点をもつ。一方後者はSchweppeらによって開発された手法で²⁾, 最適潮流計算を行なった際に算出されるノードごとのスポット料金をもとに託送料金を算出しているが, 本論文では, スポット料金の算出は行わず, 直接託送料金を求める。

託送が行なわれるような競争的市場ではwheelerは利益が最大になるように行動を行なうとする。すなわち, wheelerの利益を π とすると,

$$\pi = w_p S_p - TC \rightarrow \max \dots \dots \dots (1)$$

ただし式(1)において, w_p は託送料金, S_p は有効託送売電電力, TC はwheelerの総コストである。従って一階微分条件より,

$$\frac{\partial \pi}{\partial S_p} = 0 \text{ 即ち } w_p = \frac{\partial (TC)}{\partial S_p} \dots \dots \dots (2)$$

となる。

* 東京大学工学系研究科電気工学専攻大学院生

** " " " " 教授

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

次節以降で、具体的に託送料金の設定モデルを構成し解析を行なう。なお、以下で述べるモデルはすべて、単位時間あたりで考察している点に注意して頂きたい。

3. 託送料金設定モデルの構成

ここでは、託送が行われるとwheelerのシステム運用上の制約から、wheelerの負荷配分（本論文では、電源設備は一定としているので、以下、負荷配分結果を電源構成と呼ぶ）が変化することに注目し、モデルを構成した³⁾。

3.1 記号の定義

以下、記号の定義を行なう。なお、下線付きの記号は、ベクトル量であることを示している。

- n_B, n_L : 各々バスの総数, 送電線の総数。
- i, k : 各々バス, 送電線のインデックス。
- \underline{g}_p : 有効発電電力。 n_B 次元ベクトル。
- \underline{S}_p : 有効託送売電電力。 n_B 次元ベクトル。
- \underline{d}_p : 有効電力需要。 n_B 次元ベクトル。
- \underline{B}_p : 有効託送買電電力。 n_B 次元ベクトル。
- \underline{g}_q : 無効発電電力。 n_B 次元ベクトル。
- \underline{S}_q : 無効託送売電電力。 n_B 次元ベクトル。
- \underline{d}_q : 無効電力需要。 n_B 次元ベクトル。
- \underline{B}_q : 無効託送買電電力。 n_B 次元ベクトル。
- $\underline{\delta}$: 電圧の位相角。 n_B 次元ベクトル。
- \underline{V} : 電圧の大きさ。 n_B 次元ベクトル。
- R_k, X_k : 送電線kの抵抗, リアクタンス。
- z_{pij} : バスiからjに流出する有効潮流。
- z_{qij} : バスiからjに流出する無効潮流。
- z_{pk} : 損失を考慮した正味の有効潮流。
- z_{qk} : 損失を考慮した正味の無効潮流。

3.2 目的関数

目的関数は、wheelerの燃料費用（発電機出力の2次式で近似）の総和で、これを最小にする。すなわち、

$$TC = \sum_i (a_i + b_i g_{pi} + c_i g_{qi}^2) \rightarrow \min \dots\dots\dots (3)$$

3.3 制約条件

<潮流方程式>

バスiから流出する電力は、バスiに流れ込む正味の電力に等しい。従って、

$$g_{pi} + S_{pi} - d_{pi} - B_{pi} = \sum_j z_{pij} \dots\dots\dots (4)$$

$$g_{qi} + S_{qi} - d_{qi} - B_{qi} = \sum_j z_{qij} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、

$$z_{pij} = G_k \{ V_i^2 - V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j) \} + \Omega_k V_i V_j \sin(\delta_i - \delta_j)$$

$$z_{qij} = \Omega_k \{ V_i^2 - V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j) \} - G_k V_i V_j \sin(\delta_i - \delta_j)$$

$$G_k = \frac{R_k}{R_k^2 + X_k^2}, \quad \Omega_k = \frac{X_k}{R_k^2 + X_k^2}$$

である。

<システムの運用に関する制約>

電圧の大きさ, 電圧の位相, 発電量, および, 送電線容量に関する制約条件として、以下の条件が課せられる。

$$\underline{V}_{\min} \leq \underline{V} \leq \underline{V}_{\max} \dots\dots\dots (6)$$

$$\underline{g}_{p\min} \leq \underline{g}_p \leq \underline{g}_{p\max} \dots\dots\dots (7)$$

$$\underline{g}_{q\min} \leq \underline{g}_q \leq \underline{g}_{q\min} \dots\dots\dots (8)$$

$$0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{2} e' \dots\dots\dots (9)$$

$$\underline{z}_p^2 + \underline{z}_q^2 \leq \underline{z}_{\max}^2 \dots\dots\dots (10)$$

ただし、式(9)において、 e' は要素が全て1からなる n_B 次元ベクトルである。また、式(10)において、 \underline{z}_p^2 および \underline{z}_q^2 は n_L 次元ベクトルであり、それぞれ、 \underline{z}_p および \underline{z}_q の各要素 (z_{pk}, z_{qk}) の2乗を成分とする。 \underline{z}_{\max}^2 も n_L 次元ベクトルであり、送電線の最大容量 \underline{z}_{\max} の各要素の2乗を成分とする。

以上、託送料金設定問題は、変数 $4 n_B$ 個（決定変数は $\underline{\delta}, \underline{V}, \underline{g}_p, \underline{g}_q$ ）制約条件 $6 n_B + n_L$ 本の非線形計画問題として定式化される。このとき、有効電力の託送料金 w_p は式(2)によって与えられる。式(2)は非線形計画問題のshadow priceであり、最適化計算を行うことによって託送料金が容易に求解できる利点を持つ。

4. 具体例による数値解析

図-1のような、3バス3送電線の系統で解析を行う。

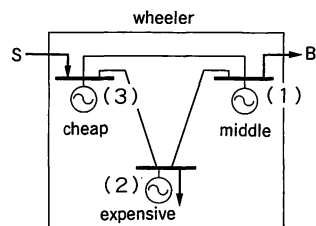


図-1 3バス3送電線系統

表1 送電線のデータ

	line1-2	line1-3	line2-3
R	0.08	0.72	0.28
X	0.37	1.05	0.64

表2 バスのデータ

	bus1	bus2	bus3
V_{min}	0.9	0.9	0.9
V_{max}	1.1	1.1	1.1
δ_{min}	0	0	0
δ_{max}	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$
g_{pmin}	0.05	0.1	0.2
g_{pmax}	0.25	0.3	0.4
g_{qmin}	-0.25	-0.3	-0.4
g_{qmax}	0.25	0.3	0.4
a_i	10	15	5
b_i	5000	7500	2500
c_i	1500	2000	1000

このシステムは非常に簡単なモデルシステムであるが、コスト特性の異なる電源、および複数の託送ルートを用意しており、システム運用上の制約と託送料金の一般性のある関係を明快に説明できる利点を持っている。そこで本節では、このモデルシステムを用いて、主としてシステム運用上の制約と託送料金の関係に主眼をおいて議論を進める。

各バスには発電機があり、バス2の発電機（以下、発電機2などとよぶ）がもっとも燃料コストが高く、以下、発電機1、発電機3の順に燃料コストが高いとする。また、バス2には既存の電力需要がある。託送取引として、バス3でシステムに電力が供給され、バス1から同量の電力が引き出される。なお、需要、託送電力の力率を外生的に与え、 $\underline{d}_p : \underline{d}_q = \underline{S}_p : \underline{S}_q = \underline{B}_p : \underline{B}_q = 5 : 1$ とした。データとして表1及び表2を用いた。データはすべてp.u.換算値であり、1000MVA、500kVを基準としている。

4.1 託送電力を変化させた場合の感度解析

バス2における有効電力需要は $d_{p2} = 500MW$ で一定とし、託送電力を変化させて感度解析を行った。送電線1-3に200MVAの容量制約を設けた場合と設けない場合の両ケースについて託送料金と求めた（他の送電線の容量制約はない）。このとき託送電力と託送料金の関係は図-2のようになる。

送電容量に制約がある場合、託送電力が210MWを越えるあたりから託送料金が急激にあがっている様子

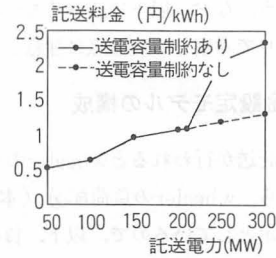


図-2 託送電力と託送料金の関係

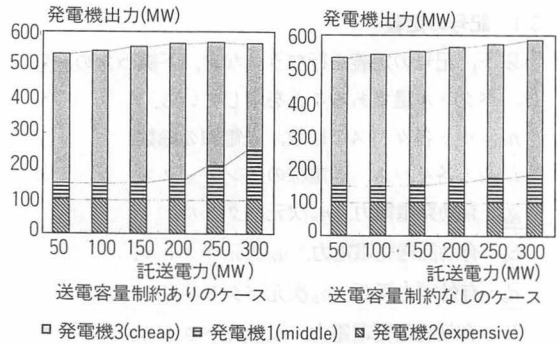


図-3 託送電力と最適電源構成

がわかる。託送電力を増やしていくと、送電線1-3の容量制約のため発電機3(cheap)を最大レベルまで発電出来なくなり、発電機1(middle)で需要をまかなわざるを得なくなるためである。

この様子は、送電容量の制約がある場合とない場合のそれぞれについて、最適電源構成の様子を示した図-3を見れば一目瞭然である。送電容量の制約がない場合は、コストのもっとも安い発電プラントから順に発電されていくが、送電容量の制約がある場合は、発電機3が最大レベルに達する前に発電機1が入ってくる。つまり、送電線の容量制約を設けると、電源構成の最適性が歪められ、料金が急激に上昇する。

4.2 電力需要を変化させた場合の感度解析

託送電力を100MWで一定とし、バス2における電

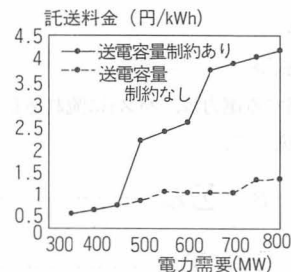


図-4 電力需要と託送料金の関係

力需要を変化させて感度解析を行った。送電線 2-3 に300MVAの容量制約を設けた場合と設けない場合の両ケースについて託送料金と求めた（他の送電線の容量制約はない）。

このとき電力需要と託送料金の関係は図-4のようになる。送電容量制約を加えると、需要が450MWを越えるあたりから託送料金が急激にあがり、また、需要が600MWを越えるあたりで再度急激にあがっている様子が読みとれる。これは、需要レベルが450MWを越えないうちは発電機3 (cheap) で需要がまかなわれていたが、送電線 2-3 の容量制約のため、需要が450MWを越えると発電機1 (middle) で需要をまかなわざるを得なくなるためである。さらに、需要が600MW付近に達すると、発電機1は発電の最大レベルに達してしまい、それ以降は発電機2 (expensive) で需要をまかなわざるを得なくなるため、600MWを越えるあたりで再度託送料金が急激に値上がりすると考えられる。一方、送電線に制約を設けなかった場合は、コストの安い発電機から順に需要がまかなわれていく。

図-5に送電容量制約がある場合とない場合のそれぞれについて、最適電源構成の様子を示した。

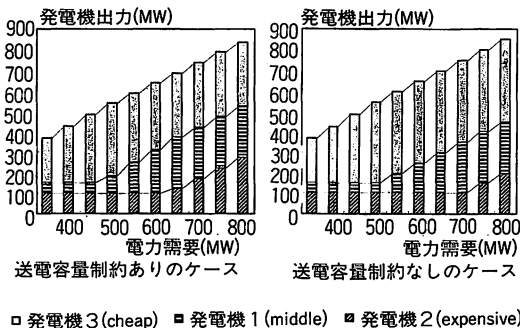


図-5 電力需要と最適電源構成

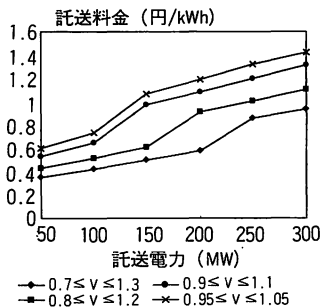


図-6 電圧の大きさの制約を変化させた場合の託送料金の挙動

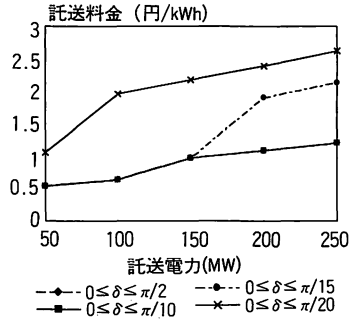


図-7 電圧位相角の制約を変化させた場合の託送料金の挙動

4.3 その他の系統運用上の制約を変化させた場合の感度解析

電圧の大きさの制約、電圧位相角の制約を変化させて感度解析を行なった。図-6に電圧の大きさの制約を変化させた場合、図-7に電圧位相角の制約を変化させた場合の託送料金の挙動を示す。なお、図-6において電圧位相角の制約は $0 \leq \delta_i \leq \pi/2$ であり、図-7において電圧の大きさの制約は $0.9 \leq V_i \leq 1.1$ である。また、図-6、図-7ともにバス2の電力需要は $d_{p2} = 500MW$ で一定であり、送電容量制約は考慮していない。

図-6、図-7双方より、系統運用上の制約を厳しくすると託送料金が上昇する様子が、読み取れる。換言すれば、系統の信頼性、安定性が向上すると、その系統使用料としての託送料金は高くなるわけで、妥当な結論といえる。

5. 送電線の拡張を考慮した場合

本節では、長期的な視点で託送料金を算定する第1ステップとして、送電線の拡張を考慮した場合に託送料金がどのような挙動を示すか分析する。本来、送電線の建設には長期のリードタイムを必要とするが、ここでは、送電線の建設費用を単位時間あたりの固定経費に換算し、設備増強が可能であると仮定して扱う。つまり、ここで考える託送料金は、将来の需要レベルや託送レベルに応じて送電線容量の増強が最適に決定された場合に設定される料金である。なおここでは、発電プラントの建設は考慮していない。

5.1 送電線の拡張コストの算定

送電線kの増強すべき容量を $f_k(p.u.)$ とおく。本来、拡張される送電線容量は基準値としてあらかじめ決定されているのが普通で、 f_k は離散型の変数である。しかし、ここでは、NLPの範囲で扱うことが出来るよ

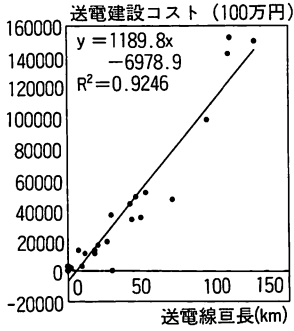


図-8 送電拡張コストと送電線巨長の関係

うに f_k を連続変数として取り扱う。

送電線の拡張コスト関数は、場所、電圧階級、建設時期、その他多くの要素に依存しているため算定が非常に難しいが、ここでは単純に送電容量と送電線巨長に比例すると仮定し、次のように推定した⁴⁾。

わが国の500kV階級の送電コストと送電線巨長(km)の関係を抜粋して、回帰をとった。その結果、回帰式は式(11)のようになる(図-8参照、コストの単位は100万円である)。

$$Cost = 1189.8d_k - 6978.9 \quad (R^2 = 0.9246) \quad \dots\dots(11)$$

そこで、ある電力会社管内の変電所からでている送電線の巨長110kmと容量1500MVAを参考に、この送電線の建設コストを推定すると、

$$C = 123899 \quad (\times 10^6) \text{ 円}$$

となる。年経費率を15%とすると、この送電の拡張コストは112635円/MVA/km/年になる。従って以下の考察では、標準的な送電線拡張コストとして、11.3万円/MVA/km/年という値を用いる。従って、すべての送電線の新設、増設コストの1時間換算値NCは、式(12)のように書ける。

$$NC = \sum_{k=1}^{n_L} 12.9 \cdot f_k \cdot d_k \text{ (k円/hour)} \quad \dots\dots(12)$$

5.2 定式化

<目的関数>

目的関数は、1時間あたりの発電燃料費用ECと送電線拡張費用NCの和を最小にすることである。すなわち、

$$TC = EC + NC \rightarrow \min \quad \dots\dots(13)$$

なお、ECは送電線拡張を考慮しないモデルと同様、発電機出力の2次式として扱う。

<制約条件>

制約条件は、送電線拡張を考慮しないモデルと、以下

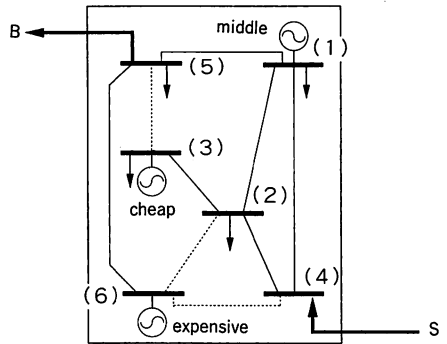


図-9 6バス6送電線系統

の点で異なる(式(10)のかわりに式(14)を用いる)。

$$\sqrt{z_p^2 + z_q^2} \leq z_{max} + f \quad \dots\dots(14)$$

$$f_{min} \leq f \leq f_{max} \quad \dots\dots(15)$$

つまり、 n_L 次元ベクトル f を、新たに決定変数として加える。以上、変数 $4n_b + n_L$ 個、制約条件 $6n_b + 2n_L$ 本の非線形計画問題として定式化される。このとき託送料金は、式(2)によって与えられる。

5.3 具体例による数値分析

図-9に示すような6バス6送電線の系統を考える。このモデル系統を用いて、送電線建設コストが託送料金に与える影響、および送電線建設容量と最適発電機出力の関係の分析に主眼をおいて議論を進める。

バス4で電力を供給しバス5から電力を引き出す託送取り引きが行なわれている。また、送電線6-2、送電線6-4、送電線3-5が新たに計画されている送電線であり、その他は既存の送電線である。既存の送電線の容量を90MWとし、既存の送電線の増設も必要に応じて認めるものとする。

バス1、バス3、バス6に既存の発電機があり、バ

表3 送電線のデータ

送電線	R	X	送電巨長(km)
1-2	0.1	0.4	120
1-4	0.15	0.6	180
1-5	0.05	0.2	60
2-3	0.05	0.2	60
2-4	0.1	0.4	120
3-5	0.05	0.2	90
2-6	0.08	0.37	90
5-6	0.28	1.05	180
4-6	0.72	0.64	90

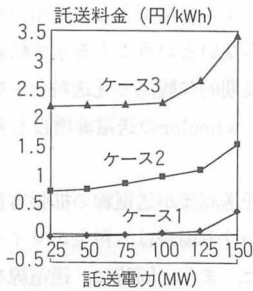


図-10 各ケースの託送料金の挙動

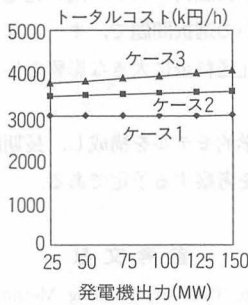


図-11 各ケースのwheelerのトータルコスト

ス6の発電機（以下、発電機6などとよぶ）が最も燃料コストが高く、以下、発電機1、発電機3の順に燃料コストが高いとする（燃料コスト関数に関しては4節と同じ関数を用いる）。またバス1、2、3、および5にあわせて600MWの既存の需要がある。

送電線のデータは表3を用いた。RおよびXは、1000MVA、500kVを基準としたp.u.換算値である。発電制約、電圧の大きさ、位相角の制約のデータ等に関しては、誌面の都合上ここでは割愛する。

送電線拡張コストが11.3万円/MVA/km/年の場合を標準ケース（ケース1）とし、送電線3-5の新設コストのみが従来の3倍になるケース（ケース2）、従来の5倍になるケース（ケース3）の3通りを想定した。

図-10に、各々のケースについて、託送電力を変化

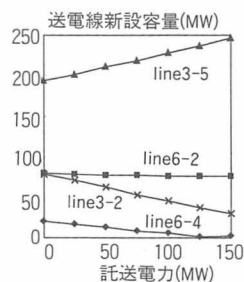


図-12 ケース1の託送電力と送電線新設容量の関係

させたときの託送料金の挙動を示す。また図-11に、その際のwheelerのトータルコストを示す。

まず図-10において、託送電力が100MW付近までは、ケース1の場合の託送料金は負であり、wheeler側から託送契約側に料金を払わなければならないことに注目すべきである。これは、託送電力が100MW付近までは、送電線6-4、6-2、3-5などのいくつかの送電線に関しては、託送を行なうことによって拡張すべき送電線の容量を減少させることができるので、料金は負になる。図-12を見ると、このことは一層明らかになる。

また、図-10と図-11を比較すると、総コストで見ると3つのケースにさほど大きな差は見られないが（ケース3におけるwheelerの総コストは、ケース1の最高1.34倍）、託送料金はかなり異なる挙動を示していることが分かる。このことは、送電線3-5のコストに対して、託送料金が敏感に反応していることを示している。

次に、各々のケースについて、託送電力を変化させたときの最適電源構成の様子を図-13に示す。図-13より、送電線3-5の建設コストが高くなるに従って、発電機3(cheap)よりも発電機1(middle)で需要をまかなおうとする様子が分かる。これは、送電線3-5を拡張して燃料コストの安い発電機でバス5の需要

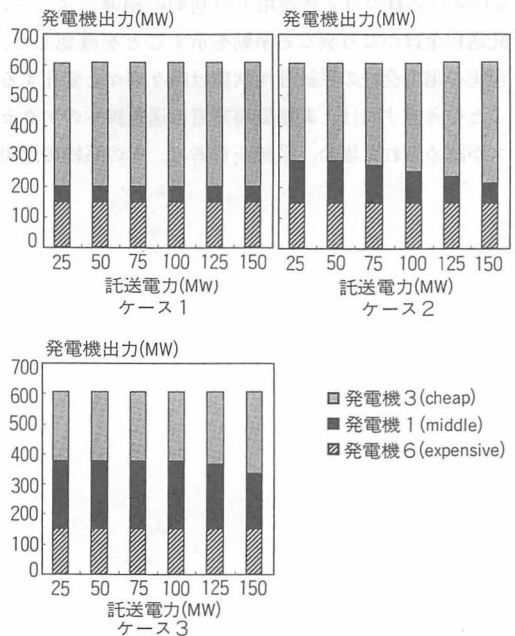


図-13 各ケースの最適電源構成の様子

をまかなうよりも、送電線を拡張せずに燃料コストの高い発電機で需要をまかなうほうがwheelerにとって経済的に有利に働くためだと解釈できる。

また、ケース2、ケース3では、託送電力が増加するにしたがって、発電機1(middle)よりも発電機3(cheap)で需要をまかなおうとする傾向があることがよみとれる。これは、以下のように解釈できる。

託送電力が増加して行くと、バス3からバス5に流れる有効潮流が増大し、その結果、送電線3-5の容量を増設して行かなくてはならない。一方、送電線3-5がいったん拡張されてしまえば、発電所としてはできるだけ燃料コストの安いプラントでバス5の需要をまかなったほうがよいため、発電機3の出力が増し、発電機1の出力が減少すると考えることが出来る。

なお、各々のケースで、託送電力が100MWをこえるあたりで料金が急激に増大しているのは、wheelerの送電コストが増大する方向に向かい、その影響が大きく出たためだと考えられる。

6. まとめ

本論文では、限界費用原理に基づいた託送料金の設定を試みた。

前半で示したモデルでは、wheelerの総コストとして燃料コストのみを考慮し、系統運用上の制約と託送料金に関係し主眼をおいて分析を行なった。ここでは、wheelerの様々な系統運用上の制約の相違によって、託送料金はかなり異なる挙動を示すことを確認した。現実の電力会社の系統運用状態は時々刻々と変化することを考慮すれば、非電気事業者の送電線へのアクセスが認められた場合、系統所有者は、その系統の運用

状態をリアルタイムの情報として非電気事業者に公開しなければならないということを示す結果とも言える。

後半では、長期的な観点で託送料金を捉える第1ステップとして、wheelerの送電線増設も考慮したモデルに拡張した。

ここでは、託送潮流が送電線の拡張容量を減少させる方向に働きかける場合は、料金がマイナスになりうることを示した。また、同時に、送電線を拡張して燃料コストの安い発電プラントで需要をまかなうか、送電線を拡張せずに燃料コストの高い発電プラントで需要をまかなうかの選択問題で、キーとなる送電線の建設コストが、託送料金に大きな影響を与えることも示された。

今後は、動学的モデルを構成し、長期限界費用に基づく託送料金を考察する予定である。

参考文献

- 1) H. H. Happ, 'Cost of Wheeling Methodology', IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9, No.1, Feb, pp. 147-156 (1994)
- 2) Michael C. Caramanis, et al. 'The Costs of Wheeling and Optimal Wheeling Rates', IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWR-1, No.1, Feb, pp.63-73 (1986)
- 3) William W.Hogan, 'Contract Networks For Electric Power Transmission : Technial Reference', Sep, (1990)
- 4) 通商産業省 電源開発の概要 (平成4年)
- 5) 塚本 : 「米国における送電アクセスを巡る動きと託送料金算定方法例」, エネルギー経済, Vol.21, No.9, pp.30-41 (1995)
- 6) 平野, 山地 : 「電力託送料金の設定に関する研究」, 第12回エネルギーシステム経済コンファレンス講演論文集, pp.73-78 (1996)