競争環境下における電力系統セキュリティ制御に関する研究

学生員 山 口 順 之 (北海道大学)

正 員 北 裕 幸 (北海道大学)

正 員 西 谷 健 一 (北海道工業大学)

正 員 長谷川 淳 (北海道大学)

Preventive Control Strategy under a Competitive Environment Based on Incentive Prices

Nobuyuki Yamaguchi, Student Member, Hiroyuki Kita, Member (Hokkaido University), Ken-ichi

Nishiya, Member (Hokkaido Institute of Technology), Jun Hasegawa, Member (Hokkaido University)

In recent years, the deregulation of the electricity industry aimed at achieving lower price of electricity is becoming a reality in many countries. In Japan, the introduction of the competition at the generation stage made it possible for independent power producers (IPP) to participate in the generation market at the bid-based wholesale level. An increase of non-utility-owned generators may reduce controllable resources for the utility such as spinning reserves. Therefore, when the security control is implemented only by the utility, the cost required for the control may become higher; this may result in higher electricity prices to consumers. Conversely, it is considered that the security cannot be maintained sufficiently using the same cost as usual.

The authors introduce "incentive prices" for leading the non-utility-generators to cooperate in the security control. The incentive prices are prices when the utility purchases the power excluding the amount specified in a bidding from the non-utility-owned generators. It has temporal variation, which reflects the ever-changing demand location variation reflected the effect of network losses and constraints. This paper presents a method for determining the desirable incentive prices. Using the proposed method, the preventive control can be executed without exceeding a security cost required in the traditional situation.

キーワード：電力系統，規制緩和，セキュリティ制御，独立系発電業者 (IPP)，誘導価格，最適潮流計算

1. 序 論

世界的な経済の自由化・競争化は，電力分野についても例外ではなく，英国に端を発した世界の電力改革の流れは，欧州から米国，中南米，アジアの多くの国に波及している。わが国では，平成7年の電気事業法の改正に伴い，卸発電事業が自由化された。これをうけて独立系発電業者 (Independent Power Producer, IPP) が入札という形で電力供給に参加することとなり，発電部門の低価格化・高効率化が期待されている。また，更なる効率化を目指し，規制緩和の議論は小売託送や，火力電源開発分野の全面的競争入札の導入にまで及んでいる。

一方でこうした競争環境下において，解決されていない問題点も存在し，その中にはいわゆる電力系統のセキュリティをどのように維持していくかという問題も指摘されている⁽¹⁾。すなわち，電力系統に占める IPP の割合が増加し，かつ IPP が予防制御に参加しない場合は，電源の硬直

化を招くこととなり，セキュリティ維持に関する系統全体の制御能力は従来に比べ低下することが予想される。これを避けるためには IPP を予防制御に参加させることが考えられるが，系統運用者の指示による制御を IPP が強いられるという予防制御では，個々の IPP の最適性が考慮されないために不経済であると同時に，系統運用者の指示の公平性という点で好ましいとはいえない⁽²⁾。

また，現在わが国において実施されている電力卸供給入札では，運用段階の IPP の出力は入札時の固定的な運転パターンに従うとされている⁽³⁾。ところが，電力系統は常にその運転状態を変化させており，導入時点で決定された IPP の運転パターンが運用段階においても合理的であるとは考えにくい。従って，IPP の出力変更に対し系統運用者による適切な買い取りが行なわれる新しい電力卸供給ルールの設定が必要と考えられる。

本論文では，現在わが国で実施されている電力卸供給 IPP 導入時点の入札制度を保持したまま，運用段階において実

施することが可能な新しい予防制御の考え方を提案する。すなわち、系統運用者は IPP に対して誘導価格を提示し、IPP は誘導価格に応じて各々に最適行動（＝出力変更）をとることによって予防制御が達成されるという考え方に立ったもので、提案手法の適用により、系統運用者は IPP 参入以前のセキュリティ維持コストを上回ることなく予防制御の実施が可能であり、IPP は各々の最適性を反映させた制御を行ないつつ、予防制御に参加することができるという特徴がある。

2. 誘導価格を用いた予防制御

〈2・1〉 誘導価格を用いた予防制御の基本的な考え方

(1) 前提条件 わが国における現行の電力卸供給では IPP の有効電力に対し買い取りを行っており、無効電力や周波数制御に対しては価格を設定していない。そこで本論文で取り扱う予防制御においても、事故後の定常状態における線路潮流過負荷を対象とする。

本論文においては、3 項目からなる前提条件を考えることとする。まず始めに、以下のような条件を設定する。

【条件 1】 系統運用者は予防制御のための IPP の契約外出力値の指令を出すことはできない。

これは、前述のごとく IPP の経済性を系統運用者の指示によって失わせないようにするためのものである。ただし、この条件の下では IPP は予防制御に協力できない。ゆえに、IPP が予防制御のために自ら契約外の電力を出力することは認めるものとする。この契約外出力は導入時点の契約から外れたものとなるため、その買い取りに関しては入札価格とは異なった、契約外出力買い取りのための新たな価格が決定されるべきである。そこで、次の条件を定める。

【条件 2】 系統運用者は IPP の契約出力と契約外出力の差分に対して誘導価格なる買電単価を設定する。

すなわち誘導価格を $C_{diffk} [¥/kW]$ とし、出力を P_k としたときの IPP (#k) の売電収入は次のように表される。

$$(\text{売電収入}) = C_k P_k^* + C_{diffk}(P_k - P_k^*) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $P_k^* (= \text{const})$ ならびに C_k はそれぞれ契約により定められた平常時の IPP 出力、買い取り単価である。系統運用者は、この誘導価格を予防制御シグナルとして IPP に通知する。IPP はその価格が受け入れられるならばそれぞれの意思に従って出力変更を行なうことができ、受け入れ難いのであれば、予防制御に参加しないという選択を自由に行なうことができる。このため誘導価格を導入しても、これまでの卸供給の入札制度を崩す必要はなく、更に IPP は自らの経済性を考慮して予防制御に参加することが可能となる。

ところで、IPP の主燃料が副生ガスや廃棄物等である場合や、IPP が熱併給電源である場合には、系統運用者だけ

図 1 誘導価格による予防制御の時間的な流れ

Fig.1. Time Flow Of Proposed Preventive Control

でなく、IPP 自身であっても経済性を考慮した出力指令を出すのは非常に困難であり、このことから、系統運用者が IPP の燃料費特性を知ることは非常に難しいと考えられる。また、IPP が、商品である電力の製造コストの一面をなす燃料費の情報を、予防制御のために社外に持ち出すことは考えにくい。そこで、最後の条件を次に挙げる。

【条件 3】 系統運用者は IPP の燃料費特性を知ることはできない。

(2) 予防制御の流れ 図 1 に、提案する予防制御プロセスの時間的な流れの例を示す。この図では、例 1 ～ 例 3 の 3 つの事例を表している。それぞれの事例において、左側が系統運用者の時間軸、右側が IPP の時間軸であり、上から下への方向が正である。

例 1 では、まず系統運用者が、各々の IPP 毎に誘導価格を計算し、誘導価格を IPP に提示する。次に IPP が提示された誘導価格を基に自社の発電機出力を決定し、その出力を申し出る。全ての IPP の出力が系統運用者に通知されると、系統運用者はそれを基に想定事故解析を行ない、予防制御が成功する見通しがあるならば、申し出に従った IPP の出力変更を受け入れを通知する。受け入れ通知を受け取った IPP は発電機出力を変更する。

例 2 は、全ての IPP の出力が系統運用者に通知され、系統運用者はそれを基に想定事故解析を行なうところまでは例 1 と同じである。この事例は、想定事故解析の結果、系統運用者は予防制御が失敗するとの判断を下した場合である。この場合系統運用者は、IPP の出力変更の申し出拒否を通知する。拒否の通知を受け取った IPP は、再び自社の発電機出力を決定し、新たな出力を申し出る。系統運用者はそれを基に再び想定事故解析を行ない、予防制御が成功する見通しがあるならば、IPP の出力変更を受け入れを通知し、発電機出力を変更する。

例 3 では、IPP が 2 回目の出力申請を行なう所までは例 2 と同じであるが、その出力変更も認められなかった場合や、通信が一時的に途絶えている場合等は、IPP は導入時の入札における契約通りの出力を行うこととなる。

図2 誘導価格の概念図

Fig. 2. Concept Of The Incentive Price

〈2・2〉最適化行動に基づくIPPの予防制御への協調
ここでは、IPPに誘導価格を提示した場合に、実際にIPPが予防制御に参加するかどうか考察する。

まず、短期的なIPPの最適化行動について考察する。図2は誘導価格の概念図である。図中縦軸はIPPの燃料費や売電収入の金額であり、横軸はIPPの発電機出力である。入札段階では、IPPは契約値に従って運転し、売電収入並びに燃料費も一定である。そこに誘導価格を提示することにより、IPPの出力に幅が生まれ、IPPは自社の利益を最大にするように出力変化を行なう。すなわち、IPPは、誘導価格提示の際の出力変化による利益が、入札時契約の利益を上回るような出力を行なう。

いま、考察対象のIPPの燃料費が $f_k(P_k) = a_{0k} + a_{1k}P_k + a_{2k}P_k^2$ であるとする、IPPの利益 β_k は次の式で表される。

$$\beta_k = C_k P_k^* + C_{diffk}(P_k - P_k^*) - f_k(P_k) \quad \dots\dots (2)$$

$$= -a_{2k}P_k^2 - (a_{1k} - C_{diffk})P_k - a_{0k} + (C_k - C_{diffk})P_k^* \quad \dots\dots (3)$$

これよりIPPが自己の利益を最大にするよう行動する場合、その出力は次の式に従う。

$$P_k = \frac{C_{diffk} - a_{1k}}{2a_{2k}} \quad \dots\dots (4)$$

(4)式より、適切な誘導価格 C_{diffk} を設定することで、IPPを予防制御に参加させることが可能となる。

さらに、IPPの入札時契約出力がIPPにとって利益最大となる出力であるならば、次式が成立する。

$$P_k = P_k^* + \frac{C_{diffk} - C_k}{2a_{2k}} \quad \dots\dots (5)$$

(5)式より、 $C_{diffk} > C_k$ ならば出力を増加させ、 $C_{diffk} < C_k$ ならば出力を減少させるように誘導させることができる(図3)。ただし、実際には各IPPの燃料費特性を正確に把

図3 誘導価格と入札価格の関係と利益最大点

Fig. 3. Optimal Generator's Output Shift And Relationship Between Incentive Price And Bidding Price

握することが出来ないため、設定された誘導価格に対して、各IPPがどれだけ出力変更するかは予めわからない。

次に、長期的な観点からIPPの最適化行動について考察する。想定事故が実際に発生した場合、系統運用者は、系統運用に責任を持っているため、IPPにも緊急制御の指令を出すこととなる。このときIPPは、利益の最大化を追求できなくなるところか、そもそも卸供給を一時的に停止しなければならない可能性もある。ゆえに、想定事故の発生確率にもよるが、長期的な観点から見れば、誘導価格のような予防制御シグナルに応答し、IPPは予防制御に協力した方が利益が大きい場合が十分に考えられる。このとき、誘導価格の算出過程においてIPPの最適化行動モデルを組み込む必要がないことがわかる。

こうしたことから、燃料費特性を考慮した短期的最適化行動ならびに予防制御の重要性を考慮した長期的最適化行動のいずれの場合についても、適切な誘導価格の設定により、IPPが予防制御に参加する可能性が十分に考えられる。ただし、先にも述べたように、各IPPの燃料費特性は予めわからないこと、および仮にその値がわかったとしてもIPPが短期的な観点のみで最適化行動をとることは考えにくいことから、誘導価格の算出過程においてIPPの最適化行動モデルを考慮できないことがわかる。

3. 誘導価格の算定手法

適切な誘導価格の決定は、IPPの協力・協調による予防制御において最も重要である。上述の考察より、誘導価格の算出過程において、IPPの最適化行動モデルを考慮せずとも良いことがわかった。一方、何らかの合理的な方法で予防制御シグナルとなる誘導価格を算出する必要がある。

本論文では、IPPからの買電コスト及び予防制御コストを含めた電力会社の系統全体のコストが、IPPの予防制御参加前後においても変化しないことが合理的であると考えている。本章では、そのための誘導価格を算出する手法を提案する。

〈3・1〉誘導価格算定のための定式化 母線 #k の事故前の出力を P_k として燃料費を $f_k(P_k)$ とすると、電力会

社の燃料費と買い取り費用との和 F は次のように表せる。

$$F = \sum_{k \in \text{Utility}} f_k(P_k) + \sum_{k \in \text{IPP}} \{C_k P_k^* + C_{\text{diff}k}(P_k - P_k^*)\} \quad \dots\dots (6)$$

右辺第一項は電力会社の総燃料費であり、右辺第二項は契約出力分の買い取り費用と契約外出力分の買い取り費用の和である。

ここで、IPP を含む系統内の発電機数を M とすると、需給平衡条件から次式が成立する。

$$\sum_{k=1}^M P_k = P_d + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{0ij} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、左辺は系統内の全ての発電機の出力である。また、右辺第一項、右辺第二項はそれぞれ総負荷および送電損失である。なお、 P_{0ij} は平常状態における母線 # i から母線 # j への線路潮流であり、潮流計算によって求めている。 N は母線数である。

次に送電容量についての制約式は以下のように与えられる。

$$P_{sij} \leq \overline{P}_{sij} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $\overline{P}_{sij}$ は母線 # i から母線 # j にかかる線路の送電容量、 i, j は線路潮流が正となる向きの組合せである。また、想定事故番号を $s(=0, 1, 2, \dots, N_s)$ とし、 $s=0$ のときは平常状態とする。

なお、想定事故後の状態 ($s \neq 0$) については、送電損失変化分をスラック母線の出力変化によって賄い、他の母線の発電機は IPP も含めて変化させないものとして潮流計算を行って求めている。

〈3・2〉提案する誘導価格の算定法 まず仮に、予防制御が電力会社のみによって実行される場合を考える。すなわち、各 IPP からの出力は P_k^* に固定されており、予防制御のための電力を IPP から購入できないとする。この場合、以下の制約式が課せられることになる。

$$P_k^* = P_k \quad (k \in \text{IPP}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

従って、この場合の予防制御問題は、(7)(8)(9) 式の制約の下で、(6) 式を最小化する電力会社の発電機出力を見出す問題として定式化される。この問題の Lagrange 関数は次式によって表される。

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = F & + \lambda \left\{ P_d + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{0ij} - \sum_{k=1}^M P_k \right\} \\ & + \sum_{k \in \text{IPP}} K_k (P_k^* - P_k) \\ & + \sum_{s=0}^{N_s} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N u_{sij} \{P_{sij} - \overline{P}_{sij}\} \quad \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ここで、 λ, u_{sij}, K_k はそれぞれ (7)(8)(9) 式に対する Lagrange 乗数である。最適解であるための必要条件は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_k} &= \frac{df_k}{dP_k} + \lambda(A_k - 1) + D_k \\ &= 0 \quad (k \in \text{Utility}) \quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_k} &= C_{\text{diff}k} + \lambda(A_k - 1) - K_k + D_k \\ &= 0 \quad (k \in \text{IPP}) \quad \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

ここで、

$$A_k = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial P_{0ij}}{\partial P_k} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$D_k = \sum_{s=0}^{N_s} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N u_{sij} \frac{\partial P_{sij}}{\partial P_k} \quad \dots\dots\dots (14)$$

である。更に、(12) 式より、

$$K_k = C_{\text{diff}k} + \lambda(A_k - 1) + D_k \quad \dots\dots\dots (15)$$

数学的には、Lagrange 乗数 K_k は等式制約 (9) 式を緩和することによって目的関数がどれだけ減少するかを表すことになる。すなわち、(9) 式の左辺の微小変化に対して電力会社のコストがどれだけ変化するかを意味する。この制約を緩和することは、IPP # k に対して P_k^* よりも小さい、あるいは P_k^* よりも大きい出力を許容することと等価であり、 K_k の値は、IPP # k に対する誘導価格 $C_{\text{diff}k}$ を決定する際に重要な意味を持つこととなる。

さて、〔条件 1・2〕に基づき、IPP からの電力出力が変更されたとしても電力会社のトータルコストは変わらないという状況を考える。この場合、 $K_k = 0$ となるように、 $C_{\text{diff}k}$ を決めれば、IPP からの電力を期待した場合でも電力会社のコストは変化しない。従って (15) 式より、

$$C_{\text{diff}k} = \lambda(1 - A_k) - D_k \quad \dots\dots\dots (16)$$

として、誘導価格とすることができる。

(16) 式から、誘導価格は 2 種類の要素 ($\lambda(1 - A_k)$ と $-D_k$) から構成されていることがわかる。全てのセキュリティ制約が満足されていれば、 $-D_k = 0$ であるので、誘導価格は送電損失を考慮した系統増分費に等しくなる。すなわち、誘導価格の第一項は IPP からの電力を受け入れることにより電力会社の燃料費をどれだけ削減できるかを意味している。この削減量は電力会社によって供給されるべき負荷の減少分に関連しており、いわゆる Spot Price⁽⁴⁾ を意味する。従って、送電損失が無視できる場合には全ての IPP が同じ誘導価格を持つことになる。

一方、誘導価格の第二項は、IPP の予防制御への参加によって、電力会社の燃料コストがどの程度削減できるかを意味している。この項は、幾つかの活性な制約を緩和するために、IPP の電力出力を調整することによって得られる経済的メリットを表している。IPP の電力出力に関する線路

図4 IEEE30 母線系統
Fig.4. IEEE 30 Bus System

潮流の感度に基づいて計算されるため、IPP が系統内のどの場所に連系されているかによって異なり、IPP の予防制御に対する貢献の大小が誘導価格に反映されることになる。

ここで、 λ の値が大きくなるにつれて誘導価格の予防制御に関する項が Spot Price に関する項にマスクされてしまう場合が考えられる。これは、目的関数を電力会社の燃料費と買い取り費用との和であるとしたためであり、競争環境下で、経済的な予防制御を行なうためにはある意味で合理的とも言える。

4. 数値計算例

提案した誘導価格の計算手法の妥当性を検討するために、図4に示すモデルシステムに対して、付録に示した計算手順を用いて数値計算を行った。まず想定事故の苛酷さと、予防制御効果に応じて誘導価格が計算されることを確認する。次に、IPPがある範囲で出力変更を行った場合（先に挙げた3項目の〔条件〕から、IPPの出力変更値を指定することはできない）について、系統全体の総燃料費の上昇が抑えられることを確認する。

想定事故は #1 - #2 (case1, 事故地点図中 con 1) 並びに #8 - #6 (case2, 図中 con 2) の2回線送電線の1回線解列事故とした。数値計算は case1, case2 及び case1 と case2 の2つの事故を同時に考慮した場合 (case3) について行った。過負荷線路は、それぞれの case における想定事故地点と同じである。IPP(A), IPP(B) 共に入札は出力 15.0[MW], 価格 6.5[¥/kW]とした。表1に case 1,2,3 のそれぞれの過負荷線路に対する IPP 出力の潮流感度ならびにセキュリティ制約に対する Lagrange 乗数 $u_{s,ij}$ を示す。

まず、誘導価格が想定事故の苛酷さと、予防制御効果に応じて計算されているかを検証するために、case1, case2 及び case3 について数値計算を行なった。計算結果を、それぞれ表 2, 表 3, 表 4に示す。これらの表は各ケースに対して提案手法を用いて求められた電力会社の予防制御の

表 1 過負荷線路に対する IPP の潮流感度
Table 1. Line Flow Sensitibites With Respect To IPP Output

case 1		平常時	con 1	
線路 #1 - #2 (過負荷)	IPP(A) の潮流感度	0.00189	0.00169	
	IPP(B) の潮流感度	-0.02334	-0.02020	
	$u_{s,1,2}$	0.0	0.60082	
線路 #8 - #6 (過負荷ではない)	IPP(A) の潮流感度	-0.05204	-0.05204	
	IPP(B) の潮流感度	-0.05531	-0.05532	
	$u_{s,8,6}$	0.0	0.0	
case 2		平常時	con 2	
線路 #1 - #2 (過負荷ではない)	IPP(A) の潮流感度	0.00187	0.00169	
	IPP(B) の潮流感度	-0.02333	-0.02351	
	$u_{s,1,2}$	0.0	0.0	
線路 #8 - #6 (過負荷)	IPP(A) の潮流感度	-0.05207	-0.04571	
	IPP(B) の潮流感度	-0.05539	-0.04863	
	$u_{s,8,6}$	0.0	3.20371	
case 3		平常時	con 1	con 2
line #1 - #2 (過負荷)	IPP(A) の潮流感度	0.00187	0.00167	0.00169
	IPP(B) の潮流感度	-0.02335	-0.02021	-0.02353
	$u_{s,1,2}$	0.0	1.20052	0.0
line #8 - #6 (過負荷)	IPP(A) の潮流感度	-0.05207	0.03345	-0.04571
	IPP(B) の潮流感度	-0.05538	0.03371	-0.04863
	$u_{s,8,6}$	0.0	0.0	3.37624
$u_{s,ij}$ の単位は [円/kW]				

$u_{s,ij}$ の単位は [円/kW]

表 2 case1 に対する誘導価格
Table 2. Incentive Prices (case1)

	出力 [MW]	誘導価格 [¥/kW]
# 1 : Utility	61.021	-
# 2 : Utility	64.225	-
# 5 : Utility	66.602	-
# 8 : Utility	65.002	-
# 13 : IPP(A)	15.000	17.399
# 11 : IPP(B)	15.000	17.534

表 3 case2 に対する誘導価格
Table 3. Incentive Prices (case2)

	出力 [MW]	誘導価格 [¥/kW]
# 1 : Utility	65.684	-
# 2 : Utility	66.610	-
# 5 : Utility	69.271	-
# 8 : Utility	55.414	-
# 13 : IPP(A)	15.000	17.967
# 11 : IPP(B)	15.000	18.115

結果と、それに基づいて計算された誘導価格を示したものである。 $u_{s,ij}$ は、制約式 (8) が微量緩和されることにより、総コストがどれだけ減少するかを示す値であり、ここでは想定事故の苛酷さを表す値と考えることとする。表1より、線路#8 - #6の過負荷は線路#1 - #2の過負荷よりも苛酷である。表2, 表3より、それぞれの case について、IPP(A)(B) の潮流感度に応じて誘導価格の値が異なることが分かる。更に case1 よりも case2 の方が $u_{s,ij}$ の値が大きいことから、case1 よりも case2 の方が誘導価格の値が大

表 4 case3 に対する誘導価格
Table 4. Incentive Prices (case3)

	出力 [MW]	誘導価格 [¥/kW]
# 1 : Utility	62.721	-
# 2 : Utility	68.325	-
# 5 : Utility	70.458	-
# 8 : Utility	55.415	-
# 13 : IPP(A)	15.0	18.063
# 11 : IPP(B)	15.0	18.237

図 5 IPP 出力変更に伴う総燃料費の変化
Fig. 5. Variation Of Total Cost

きい。これらの試算結果より、想定事故の苛酷さと、予防制御効果に応じて、誘導価格が公平に算出できることが確認できた。また、表 4 より、複数の想定事故についても同様に誘導価格が計算できることが確認できた。

次に、IPP の出力変更に対しても、系統全体の総燃料費の上昇が抑制できることを確認するために、次に示す手順により計算を行なった。

- (1) IPP の出力を入札時契約出力に固定し、提案した算出手法を用いて誘導価格を算出する。これを基本ケースとして総燃料費を計算する。
- (2) IPP(A) 並びに IPP(B) の出力について、7.0[MW] から 23.0[MW] まで 2.0[MW] 刻みでそれぞれ変化させる。
- (3) 変更された IPP 出力を用いて、再び最適潮流計算を行ない、総燃料費を計算する。
- (4) IPP 出力変更前と後の総燃料費を比較する。

なお、簡略化の為に考察時間を 1 時間としてコスト計算を行なった。試算結果を図 5 にまとめた。総燃料費の最大値と最小値の差は、およそ 0.3% 程度であり、提示された誘導価格に応じて IPP が出力を変化させた場合について、総燃料費の増大を抑えることが出来ることが確かめられた。

5. 結 論

本論文では、現在わが国で実施されている電力卸供給 IPP 導入時点の入札制度を保持したまま、運用段階において実

施することが可能な新しい予防制御の考え方として、誘導価格による IPP の予防制御への協力・協調の枠組みを提案した。さらに、数値計算例によって、誘導価格に応じて IPP が出力を変化させた場合について、総燃料費の増大を抑えることが出来ることを確認した。

先に述べたように、IPP が自社の利益を最大化するためには、短期的な燃料費特性による最適化だけでは出力を決定することは無いものと考えられる。従って、誘導価格のような協調・協力に必要な情報が配信されるならば、IPP の発電機出力について指令を出さずとも、IPP の最適化行動に基づく予防制御への参加は可能であると考えられる。

なお、提案手法を拡張することで、需要家の負荷遮断についても、適切な遮断単価に基づいて公平に協力を要請することが可能となる。このため、制御変数として、IPP からの電力に加え、負荷遮断も考慮することなどを、今後の展望としたい。

本研究は、文部省科学研究費補助金（奨励研究（A）課題番号:10750202）を受けていることをここに付記する。

（平成 11 年 5 月 6 日受付、同 12 年 1 月 4 日再受付）

文 献

- (1) 豊田 淳一：「新しい電力輸送・供給システム」特集号によせて，電学論 B, 117 巻, 1 号, pp.1 (1997-1)
- (2) R.John Kaye, Felix F.Wu and Pravin Varaiya : "Pricing for System Security", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.10, No.2 (1995-5)
- (3) 鈴木 紀臣：「IPP・自己託送の現状と今後の展開-東京電力-」, OHM 誌 (1998-1)
- (4) Fred C. Schweppe, Michael C. Caramanis, Richard D.Tabors and Roger E. Bohn : "Spot Pricing of Electricity", Kluwer Academic Publishers, 1998
- (5) 栗原 郁夫, 高橋 一弘：「自律的な分散方式による電力系統の監視制御理論の開発」, 電学論 B, 111 巻, 11 号, pp.1199-1207 (1991-11)

付 録

誘導価格の計算手順

誘導価格を計算するためには、Lagrange 乗数を正確に求めることが望ましい。ここでは、本論文の数値計算例において使用した誘導価格計算手順を示すが、誘導価格の計算そのものは計算手順に依るものではない。

付図 1 は計算手順の概要である。計算は最適潮流計算 (ii) を行ない、そのときの Lagrange 乗数を用いて (16) 式に従って誘導価格を計算する (iii) という流れで実行される。

最適潮流計算 (ii) では、全ての想定事故（平常状態も含む）について潮流計算を行なう部分 (iv) と、経済負荷配分を行なう部分から構成されている (v)。

潮流計算部 (iv) には、付表 1 に従って Lagrange 乗数 $u_{i,j}$ を更新する部分 (vi) が含まれている。 $u_{i,j}$ は、制約逸脱量に応じてその値を徐々に増加させるという方法を用いている⁽⁶⁾。ここで、 n は繰り返し番号、 ϵ は許容誤差、 α は正の定数である。

付図1 計算手順の概要

app. Fig. 1. Overall Flowchart

付表1 u_{sij} の更新app. Table 1. Method for Updating u_{sij}

$P_{sij} - \bar{P}_{sij} < 0 \Rightarrow u_{sij}^{n+1} = 0$
$0 < P_{sij} - \bar{P}_{sij} < \epsilon \Rightarrow u_{sij}^{n+1} = u_{sij}^n$
$\epsilon < P_{sij} - \bar{P}_{sij} \Rightarrow u_{sij}^{n+1} = u_{sij}^n + \alpha (P_{sij} - \bar{P}_{sij})$

西谷 健一 (正員) 1947年2月11日生。69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，91年4月北海道工業大学電気工学科教授，現在に至る。電力系統工学，特に電力系統状態推定，解析及び運用・計画に関する研究に従事。工学博士。システム制御情報学会，電気設備学会会員。

長谷川 淳 (正員) 1943年12月13日生。71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，85年4月同教授。95年4月改組により，同大学大学院工学研究科システム情報工学専攻電磁エネルギーシステム工学講座担当となり，現在に至る。主として，電力系統の計画・運用・制御・解析，及びエネルギー貯蔵に関する研究に従事。工学博士。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，電気設備学会会員。

山口 順之 (学生員) 1974年8月5日生。97年3月北海道大学工学部電気工学科卒業。99年3月同大学大学院工学研究科システム情報工学専攻修士課程修了。同年4月同大学大学院博士後期課程へ進学，現在に至る。主として電気事業の規制緩和に関する研究に従事。

北 裕 幸 (正員) 1963年5月7日生。88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。89年4月同大学工学部電気工学科助手，95年4月同大学大学院工学研究科システム情報工学専攻助教授となり，現在に至る。博士(工学)。主として電力系統の計画・運用・制御に関する研究に従事。日本OR学会，電気設備学会会員。