

競争的電力市場における供給信頼度評価の基礎的検討

Basic Study for Evaluation of Supply Reliability in the Competitive Electricity Market

キーワード：競争的電力市場、供給信頼度、社会厚生最大化、停電コスト

岡田 健司 栗原 郁夫 渡辺 尚史

近年、電気事業への競争原理導入が世界的潮流となっている。我が国でも、卸電力市場の部分的自由化が実施され、小売送電制度の実用化が検討されている。小売レベルの競争が導入された電力市場においても、電力システム全体が効率的に運用・構築され、電力市場での公平な競争が維持されなければ、自由化導入の目的を達成することができない。さらに、自由化が進展したとしても、系統運用上、想定外の需要変動、電源脱落や送電線事故に対処できる十分な供給予備力を確保し、系統全体の供給信頼度を維持していく必要がある。本稿では、競争的な電力市場においてどの程度の供給信頼度を確保すべきかなどの点について検討する。

- はじめに
 - 供給信頼度確保の考え方
 - 確定論的評価
 - 確率論的評価
 - 競争的電力市場下での供給信頼度評価
 - 新たな視点
 - 競争的電力市場下での信頼度評価の枠組み
 - 信頼度評価の留意点
 - テストモデルによるシミュレーション結果と考察
 - 供給信頼度維持を考慮した需給均衡モデル
 - テストシステムによるシミュレーション結果
 - まとめと今後の課題
- 参考文献
付録1 停電時の平均社会厚生への補足
付録2 発電機ならびに需要家の諸特性

1. はじめに

近年、電気事業の規制緩和が世界的な潮流として進展し、競争的な電力市場が形成されつつある。さらに、多様な発電事業者が参入する競争的電力市場の下では、コストダウン圧力の高まりにより、系統運用の複雑化、既存設備の稼働率向上、設備投資の抑制などが進むものと考えられる。電力自由化が先行する諸外国では、これらが現実の問題となりつつある。これらのいずれも電力システムの供給信頼度と密接に関わっている。

競争的電力市場の下で供給信頼度をどのように確保していくかという問題は、電力自由化が抱える大きな課題であり、信頼度管理といった制度的側面と、競争的市場での適切な信頼度レベルの

維持といった技術・経済的側面を持つ。前者については米国のNERCの改編¹⁾に代表されるような動きであり、後者は英国において自由化直後に行われた供給信頼度基準の再検討²⁾があげられる。

本稿では、競争的電力市場のもとで供給信頼度を評価する際の基本的な枠組みについて、技術・経済的側面から基礎的な検討を加える。特に、従来の考え方との違いや予想される新たな課題に焦点をあてて議論する。

2. 供給信頼度確保の考え方

2.1 確定論的評価

従来、電力システムの供給信頼度は、電源と系統でと別個に議論されてきた。この内、系統については、想定した「外乱」に対して「系統が満た

すべき性能」の組み合わせをもって信頼度基準とする確定論的手法が採用されてきた。最も基本となるのは、単一設備の事故や停止に対しては供給支障が生じないように計画や運用を行うことであり、通常 (n-1) 基準と呼ばれている。

2.2 確率論的評価

これまでも電源に関する供給信頼度評価は、確率論的手法がベースでとなり、わが国では見込み不足日数0.3日/月が信頼度基準の目標とされてきた。一方、系統についても確率論的手法を適用しようとする動きが欧米を中心に以前からもあった。これは、供給信頼度を定量的に評価することでコストと信頼度との関係を明確にし、より効率的な計画を実現しようとするものである。すなわち、信頼度とコストの間には、図1に示すような関係があり、供給コストと停電コストを加えた社会コストを最小化する点が最も望ましい信頼度レベルであるという考え方である^[3]。そのうち、検討に必要な停電コストの評価は主に欧米を中心に行われ^[4]、またいくつかの国ではこうした考えを部分的にも実務に反映させている。

3. 競争的電力市場下での供給信頼度評価

3.1 新たな視点

競争的電力市場下での供給信頼度に関わる諸問題を評価するにあたって、新たに以下のような

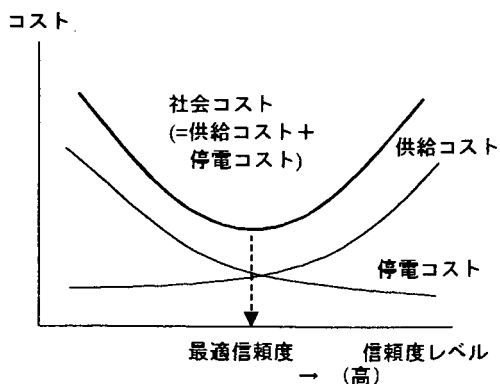


図1 信頼度レベルと社会コスト

点を考慮すべきであると考えられる。

- ・ 参加者の不確実性：電源の実現性（例えば、立地、容量、信頼度）。さらに、電力取引先、取引量、期間などの不確実性。
- ・ 系統異常の発生：混雑発生（場所、頻度、大きさ、解消法）。Ancillaryサービスとの関係など。
- ・ 需要家の多様性：信頼度に対する様々な要求。電力供給先の変更や自家発電設備の設置による代替手段の多様性など。
- ・ 透明性の確保：系統運用・制御の根拠、系統増強・費用配分の根拠の説明性。
- ・ コスト評価：総括原価から多数の参加者の費用。

この内、参加者の不確実性は、従来、信頼度評価における不確実性がもたら事故の発生を対象に議論されてきたのに対し、取引の不履行など社会的な不確実性が新たな問題となることが予想されることを意味する^[5]。また、送電系統内での混雑の発生には、従来、系統増強の主要因が信頼度の確保であったのに対して、「安価な電力」の購入が出来ないこと、つまり電力取引の制限も要因になり得ることも含まれる。

3.2 競争的電力市場下での信頼度評価の枠組み

従来の電力供給体制では、実現性はともかく、図1に示すような関係が、最適信頼度レベルを評価するためのひとつの規範であると考えられてきた。問題は、電力自由市場下で、供給信頼度レベルはより高くあるべきか、あるいは低くあるべきかを判断するとともに、その理論的根拠を示すことである。

一般的に、市場における生産者および消費者それぞれの行動規範は次のように考えることができる。

生産者：生産者余剰 (PS)

$$= \text{売上 (S)} - \text{費用 (C)} \rightarrow \text{最大化 (1)}$$

消費者：消費者余剰 (CS)

$$= \text{効用 (U)} - \text{支出 (E)} \rightarrow \text{最大化 (2)}$$

生産者余剰 (PS) は、供給曲線と水平な価格線

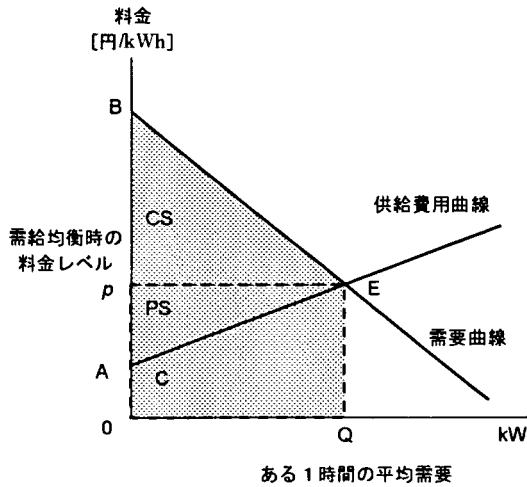


図2 消費者余剰と生産者余剰

とで囲まれた領域(図2の領域pEA)である。電力価格を p 、電力販売量を x^s とすると売上げ px^s と費用 C の差額である利潤 π に等しい¹。

一方、消費者余剰は、需要曲線と水平な価格線とで囲まれた領域(図2の領域BEp)で、電力需要を x^d とすると、 $CS = \int_0^Q x^d(t, p) dt$ である。古典的なデュピュイ＝マーシャルの消費者余剰は次のように解釈できる。ここで、電力市場には n 人の消費者がいて、それぞれの電力消費量を x_i とし、各消費者の個別効用を $u_i(x_i)$ としよう。この個別効用を、ステップ関数とした次式のような消費者全体の効用関数を仮定する。

$$U(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_i^n u_i(x_i) \quad (3)$$

このとき、消費者余剰(CS)は各消費者が支払って良いと思う額と市場価格(p)の差の消費者全体の合計であり、次のように表される。ただし、 u'_i は $\partial u_i / \partial x_i$ で各消費者の限界効用である。

$$\sum_i u'_i(x_i)x_i - p \sum_i x_i \quad (4)$$

全体の効用 U が一次同次であれば、次式のように表すことができる⁴。

$$U(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_i \frac{\partial U(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} x_i \quad (5)$$

$$\frac{\partial U(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} = u'_i(x_i) \quad (6)$$

$$U = \sum_i u'_i(x_i)x_i \quad (7)$$

上記のように、(2)式の効用 U は個別限界効用と消費量の積の和 $\sum u'_i(x_i)x_i$ を用いて表わせる。

資源配分の効率性を重視する経済学の立場から、次式のような生産者余剰と消費者余剰の和である社会厚生 SW を最大化することが望ましいと考えられる。

$$SW = PS + CS \rightarrow \text{最大} \quad (8)$$

上式の解と先の(1)式と(2)式について個別に各経済主体ごとに解かれた解は、市場の失敗等の理由により一致しない可能性がある。したがって、本研究では、(8)式を市場全体の経済合理性を評価する基準とする。

競争的電力市場内の電力取引量の最適化にあたって、ある信頼度(r)レベルでの生産者(発電事業者)の費用曲線と消費者(需要家)の需要曲線が与えられたとすると、各主体の行動規範を決定する各変数の間には、図2に示すような関係にある。停電が発生した場合、消費者にとっては効用が失われることとなり、その期待値を ΔU とする。この場合、同時に ΔS 、 ΔC 、 ΔE も発生する。これは図3で示されるように、停電による電力供給の減少、つまり供給曲線の上方シフトにより、CSとPSの領域の面積が変化することである。

¹ ホテリングの補題より

$$PS = \int_0^p x^s(t, p) dt = \int_0^p \frac{\partial \pi(t, p)}{\partial p} dt = \pi(p) = px^s - C$$

² 詳しくは奥野・鈴村(1985)「ミクロ経済学I」(岩波書店、1985年)の第13章を参照。

³ デュピュイ＝マーシャルの消費者余剰の説明では、各消費者は x_i 単位で買うか全く買わないかという悉無択的な選択を行

い、限界効用 $u'_i(x_i)$ が p と等しくなるまで x_i を変化させることが出来ない状況を想定している。各消費者が x_i を変化させることが出来れば、 $u'_i(x_i) = p$ である。

⁴ $\lambda y = f(\lambda x_1, \lambda x_2, \dots, \lambda x_n)$ という関係を満たす一次同次関数は $\partial f(\lambda x) / \partial \lambda x_i = \partial f(x) / \partial x_i$ であるというオイラー定理を用いると $\partial \lambda y / \partial \lambda = \sum (\partial f(x) / \partial x_i) x_i$ であるから(5)式が成立。

このとき、停電を考慮した期待値としての社会厚生は、具体的には次のようになる。

停電を考慮した期待社会厚生 $e(SW)$ は、

$$\begin{aligned} e(SW) &= (1-\theta)SW^N + \sum_{i=1}^m \theta_i SW^{OUT(i)} \\ &= SW^N - \sum_i \theta_i (SW^N - SW^{OUT(i)}) \end{aligned} \quad (9-a)$$

である。なお $e(\bullet)$ は期待演算子である。

ここで、 SW^N は健全時の社会厚生、 $SW^{OUT(i)}$ は停電状況 i の社会厚生、 θ_i は停電状況 i の生じる確率、 m は停電状況の数、また健全である確率は、

$$\theta_0 = 1 - \theta = 1 - \sum_{i=1}^m \theta_i \quad (9-b)$$

で表すことができる。

ここで、次式のような停電事故時の平均社会厚生 SW^{OUT} を導入する。

$$SW^{OUT} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\theta_i}{\theta} \right) SW^{OUT(i)} \quad (10)$$

ただし、 $\sum_{i=1}^m (\theta_i / \theta) = 1$

これは、様々な事故をひとつの等価的事故として平均化した停電事故時の社会厚生である。したがって、上記の期待社会厚生は次式のようになる⁵。

$$\begin{aligned} e(SW) &= SW^N - \theta(SW^N - SW^{OUT}) \\ &= SW^N - \theta \Delta SW \\ &= SW^N - \theta(\Delta CS + \Delta PS) \\ &= SW^N - \theta(\Delta U - \Delta E + \Delta S - \Delta C) \end{aligned} \quad (11)$$

さらに、需給均衡 $E=S$ 、つまり $px^d = px^s$ が常に成立していれば、期待社会厚生は、

$$\begin{aligned} e(SW) &= U^N - C^N - \theta(\Delta U - \Delta C) \\ &= U^N - \{C^N + \theta(\Delta U - \Delta C)\} \\ &= U^N - (C^N + \theta \Delta CS + \theta \Delta PS) \end{aligned} \quad (12)$$

⁵ (θ_i / θ) は、事故が起きるかどうかもで考慮せずに、事故が起きたときに、それぞれの事故の影響を全体で平均化して評価する際のウェイトである。

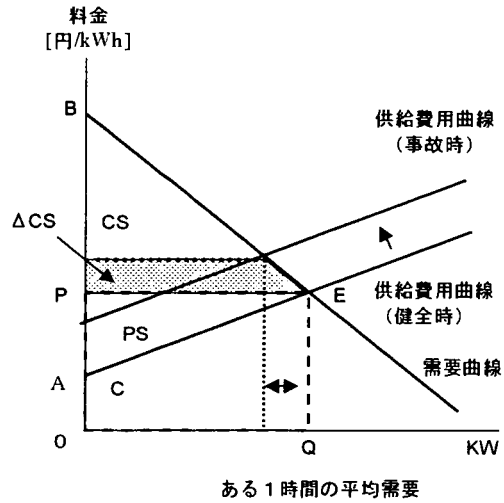


図3 停電コストと消費者余剰と生産者余剰

となる。停電を考慮した場合、上式の期待社会厚生を最大化することが望ましいことになる。なお、効用 (U) が信頼度 (r) に関して一定とすれば(12)式は以下の(13)式を最小化することと同値である。

$$C^N + \theta \Delta CS + \theta \Delta PS \quad (13)$$

原価主義に基づく供給体制のもとでは、原理的には、 $\Delta PS=0$ であり、 ΔCS と C^N の和を最小化する図1の形となる。ここで、前者は停電コストに相当する。なお、 U が r に対して一定となるのは信頼度レベルの変化により需要曲線がシフトしないことを意味する。

つまり、停電による電力供給の減少が ΔQ であったとすると単位費用でみた各停電時の停電コストは、消費者余剰の減少分を電力供給の変化分で割った $\Delta CS / \Delta Q$ である。これを図3で示すと ΔCS は灰色の領域で、供給曲線の上方シフトによる減少分 ΔQ は両側矢印の曲線の長さである。もし停電によって電力供給のすべてが断たれる事態となったら、消費者余剰のすべてが失われ、健全時の供給量を Q とすると、停電コストは CS/Q となる。期待停電コストはこれらの値にそれぞれの事故確率を乗じて集計した値である。

3.3 信頼度評価の留意点

前節では、需要が信頼度の影響を受けない、つまり U が r に非感応的であるとした。しかし、料金が高くても信頼度の高い電力を望む消費者や信頼度が低くても安価な電力を望む消費者の存在がアンケートなどからも明らかになっている⁶⁾。そのため、競争的電力市場のもとでは、電力の品質に対する要求が多様化し、顕在化するものと考えられる⁶⁾。従って、新たな環境下での信頼度レベルの議論は、 U を r の変数と見た、より基本的な社会厚生最大化の枠組み中でなされるべきであろう。

したがって、(12)式の適用にあたっては、 U の信頼度 r との関係（信頼度レベルによる需要曲線の変化、需要レベルの変化）を考慮する必要もある。また、競争的環境への移行に伴って、市場内の価格形成の在り方も原価主義から限界費用主義への変化するものと考えられる。

その際、社会厚生を最大化するという意味で最適な供給信頼度を達成できるかという問題もある。そこで、 U が信頼度 r に対して感応的である場合、最適性の問題を競争環境下で生じる信頼度の管理と消費者の評価、つまり需要の反応の関係で考えて見る。その際、財一般の品質に関するスペンス(1975)^[6]のモデルを需要と電力の信頼度の関係に応用して考えてみる。ここで、信頼度を r とし、 $p(x, r)$ を電力の逆需要関数として、消費者余剰をこの逆需要関数で表すと、社会厚生 SW は次式のように定義できる。

$$\begin{aligned} SW &= \int_0^x p(s, r) ds - C(x, r) \\ &= \int_0^x p(s, r) ds - xp(x, r) + \pi(x, r) \end{aligned} \quad (14)$$

信頼度レベル r が社会厚生に与える影響は、次

式のようになる⁷⁾。

$$\frac{\partial SW}{\partial r} = \int_0^x \frac{\partial p(s, r)}{\partial r} ds - x \frac{\partial p(x, r)}{\partial r} + \frac{\partial \pi}{\partial r} \quad (15)$$

競争環境下で、電力会社が信頼度管理を独占的に行うとすると、信頼度レベル r は、前節の(1)式で示されたように生産者余剰、つまり利潤 π を最大にするための制御変数となる。そのため、信頼度に関する供給企業の最適条件のひとつである $\partial \pi / \partial r = 0$ が満足されている場合、 $(1/x) \int_0^x [\partial p(s, r) / \partial r] ds$ が $\partial p(s, r) / \partial r$ より大きければ $\partial SW / \partial r > 0$ 、その逆であれば $\partial SW / \partial r < 0$ となる。

つまり、 $(1/x) \int_0^x [\partial p(s, r) / \partial r] ds$ が $\partial p(s, r) / \partial r$ より大きければ、電力会社により社会的に見て低すぎる信頼度が供給され、逆に小さければ高すぎる信頼度が供給されることを意味する。もちろん等しければ、 $\partial SW / \partial r = 0$ で最適な供給信頼度が提供されていることとなる。

ここで、 $(1/x) \int_0^x [\partial p(s, r) / \partial r] ds$ は、信頼度に対する消費者の平均的評価で、 $\partial p(s, r) / \partial r$ は限界の消費者の評価である。つまり、供給信頼度に対する平均的評価と限界の評価の相違が、社会的に最適でない供給信頼度をもたらしている。この消費者の平均的評価と限界的评价の大小関係は $\partial^2 p / \partial r \partial x$ の正負に依存する。 $\partial p(s, r) / \partial r$ が負であれば平均的評価は限界的评价より高く、逆に正であれば平均的評価は限界的评价より低くなる。

平均的評価と限界的评价の乖離が、供給信頼度が社会的に最適とならない要因となる。この乖離の下では、私企業が管理主体であるため x についての最適条件の他に $\partial \pi / \partial r = 0$ も達成するように行動する限り、独占市場や完全競争であれ、市場構造に依存せず供給信頼度が社会的に最適でない可能性はある。むしろ、供給信頼度の管理主体が、 $\partial \pi / \partial r = 0$ を考慮する必要のない者である必

⁶⁾ 一方、競争の激化は、ネットワークの混雑を発生させるなど、品質に対する消費者の要求とは無関係に ΔCS の発生頻度とその発生要因を増加させる可能性もある。

⁷⁾ ここでは、信頼度に対する消費者の多様な選好に合わせて多様な信頼度を提供するというサービス、いわゆるプライオリティ・サービスを考慮していない。

要がある。あるいは、信頼度レベル r が企業自身の管理下にあっても、 $\partial SW / \partial r = 0$ となるように平均的評価と限界的评价の乖離をバランスさせるため、企業の最適条件のひとつである $\partial \pi / \partial r = 0$ を達成するような行動をさせないように、規制する必要がある。

4. テストモデルによるシミュレーション結果とその考察

4.1 供給信頼度維持を考慮した需給均衡モデル

(1) 短期電力市場の需給均衡のモデル化

完全競争電力市場の下、ある時間帯で系統全体の社会厚生を最大とする需給均衡量（市場内の電力取引量）を求めるために、次式のように、各発電事業者の発電費用 ($C_j(G_j)$) と需要家の便益 ($B_i(D_i)$) で構成される目的関数を仮定した^[7]。

$$OBJ = \sum_{j=1}^{NG} C_j(G_j) - \sum_{i=1}^{ND} B_i(D_i) \quad (16)$$

ここで、 $C_j(G_j)$ はある時間帯での発電事業者 i の供給量 G_j [MW] の発電費用（燃料費）、 $B_i(D_i)$ はある時間帯での需要家 i の需要量 D_i [MW] の便益、 NG は系統に連系する発電事業者の総数、 ND は需要家の総数である。

上記の目的関数の最小点を求めれば、社会厚生を最大化する需給均衡点を求めたことと等価である。さらに、上記の目的関数の最小化を図る際に、制約条件として系統内の需給均衡制約、各発電機の上制限制約、需要量の非負制約を仮定した^[7]。また、今回のシミュレーションでは、発電機事故を考慮した供給信頼度の評価に重点をおくため、各送電系線を通る電力潮流に関する制約条件（送電線容量制約など）は考慮しない。

(2) 供給信頼度評価指標

発電事業者の発電設備に関わる供給信頼度の評価指標として、LOLP (Loss of Load Probability) などが用いられるが、本稿では、電力市場での供

給信頼度の指標として、系統内の事故（発電機事故）に対する供給不足電力期待値 (Expected Unserved Power : EUP) を用いた。

さらに、発電機の運転状態を、健全であるか事故で運転停止しているかの2つ状態で表すとする。仮に、系統でNG台の発電機が運転している場合、事故を考慮した系統状態 (NST) は 2^{NG} となる。各状態の発生確率 (θ_{st}) は、発電機の運転状態と事故確率の組み合わせから求めることができる^[8]。さらに、各状態の供給量 (SP_{ST}) のうち、全発電機が健全である状態の供給量 (SP_N) と1台以上の発電機が事故で運転停止している状態での供給量の差分から各状態の供給不足電力 (UP_{ST}) が求められる。よって、次式のように、各事故状態の供給不足量 (UP_{ST}) とその発生確率 (θ_{st}) から、系統全体での期待値としての供給不足電力 (EUP) を算定することができる。

$$\begin{aligned} EUP &= \sum_{st=1}^{NST} EUP_{st} = \sum_{st=1}^{NST} (\theta_{st} \times UP_{st}) \\ &= \sum_{st=1}^{NST} \{\theta_{st} \times (SP_N - SP_{st})\} \end{aligned} \quad (17)$$

(3) 供給信頼度維持を考慮した需給均衡モデル

市場内である供給信頼度水準を維持し、社会厚生を最大化とする取引量（需給均衡量）を求めるために、各状態の社会厚生最大化を考慮し、次式のような目的関数と制約条件を仮定した。

$$OBJ = \sum_{ST=1}^{NST} [\theta_{ST} \{ \sum_{j=1}^{NG} C_j(G^{ST}_j) - \sum_{i=1}^{ND} B_i(D^{ST}_i) \}] \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^{NG} G^{ST}_j = \sum_{i=1}^{ND} D^{ST}_i \quad ST=1, 2, \dots, NST \quad (19)$$

$$G_{\min_j} \leq G^{ST}_j \leq G_{\max_j} \quad ST=1, 2, \dots, NST \quad (20)$$

$$D^{ST}_i > 0 \quad ST=1, 2, \dots, NST \quad (21)$$

$$EUP \leq EUP_R \quad ST=1, 2, \dots, NST \quad (22)$$

ここで、 G_{\min} 、 G_{\max} は各発電機出力の上下限出力制約、 EUP_R は市場内に課されるEUP規制水準（供給信頼度の規制水準）で、系統運用者 (ISO など) が、系統運用上の制約を考慮して設定するものと

する。

したがって、上記の需給運用モデルでは、健全時・発電機事故時の双方で、信頼度を維持するように市場内の需給調整が図られる。

4.2 テスト系統によるシミュレーション結果

(1) シミュレーションの設定

供給信頼度 (EUP) 調整による、市場内の社会厚生への影響を検討するために、付録2に示すような各種特性を持つ発電機ならびに需要家を想定したテストモデルを用いたシミュレーションを行った。

さらに、本シミュレーションでは、以下のような供給信頼度調整方法の違いを仮定し、社会厚生への影響について評価した。

- (a) 停電回避重視ケース：健全時には社会厚生が最大となるよう市場での電力取引量 (需給均衡量) を決める。ただし、発電機の事故時には、経済性を無視して負荷遮断を回避することを最優先とし、運転可能な発電機の出力を最大出力まで増加させる。この場合、供給信頼度調整 (EUP制約の考慮) は、健全状態のみで行う。
- (b) 社会厚生最大化ケース：健全時および事故時の両者とも、そのときの社会厚生が最大となる需給均衡点で電力取引を行う。ただし、供給信頼度調整は、健全時のみで対応する場合 (SW1ケース) と健全時と事故時の両者で対応する場合 (SW2ケース) を想定した。

(2) 供給信頼基準変更による社会厚生への影響

付録2に示すよう系統に3台の発電機 (G1,G2,G3) が接続される場合、発電機事故が発生しない場合 (健全時) の市場内の取引量 (=需給均衡量=総需要量) は688.2MWとなり、G1が201MW、G2が258.4MW、G3が228.8MWを市場に供給する。この時の市場取引価格 ($\lambda=p$) は、

13.12円/kWhで、系統全体の社会厚生は約3510千円となった。

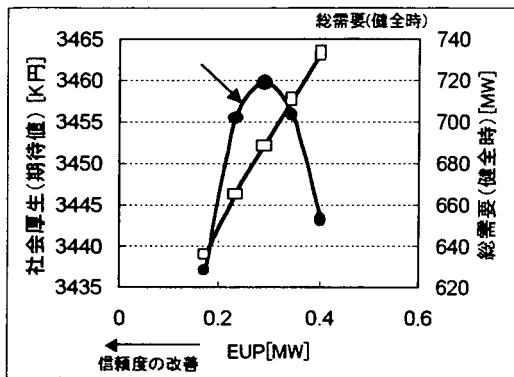
事故時には運転可能な発電機の最大出力運転を行う停電回避重視ケースでは、表1に示すように、各系統状態 (NST=2³=8) の内、事故発生時でも供給不足電力 (=停電=負荷遮断量) がゼロになる場合がある。よって、系統全体でのEUPは、0.289MWとなり、健全時を含む全系統状態を考慮した社会厚生の期待値は約3459千円となる。このケースで社会厚生が最大となる最経済状態は、EUP調整を行わない (EUP制約を考慮しない) 場合である。この時のEUP (0.289) の0.6~1.4倍にEUP制約値 (EUP_R) をパラメータとして設定し、感度分析としてこの各設定値を満たすように健全時の需給均衡を決定して各期待社会厚生を求めた。このときの期待社会厚生の変化を見たのが図4である。最経済状態 (EUP=0.289) からEUP制約値を小さくした場合 (信頼度を改善) でも大きくした場合 (信頼度基準の緩和) でも、社会厚生 (期待値) は、最経済状態よりも小さくなる。信頼性を改善した場合は、需要家に信頼度改善による費用負担の増加が市場価格を上昇させ、需要量を減少させる。つまり、信頼度制約維持にかかる付加的費用の発生により社会厚生も減少する。一方、信頼度基準を緩和した場合は、事故率が低く限界費用が低い発電機の出力配分の増加により市場価格が低下し、需要量は増加する。しかし、発電事業者の利潤低下により、信頼度改善と同様に社会厚生は最経済の水準よりも小さくなる。

同じ発電機構成の下で、社会厚生最大化ケースについて見てみると健全状態の総発電量 (=総需要量)、社会厚生や市場価格は停電回避重視ケースと同じである。しかし、このケースでは事故後も社会厚生が最大となるように需給調整を行う。そのため、表2に示すように、EUP調整を行わない時の社会厚生 (期待値) は3467.5千円、EUP値は8.81MWと、前述の停電回避重視ケースと比較するとEUPの値は大きいものの、社会厚生は増加

表1 各系統状態での供給量・社会厚生ならびにEUP
(停電回避重視ケース、発電機数3台)

状態**	発生確率 (%)	最大発電量 (MW)	供給量 (MW)	EUP* (MW)	社会厚生* (千円)
1	91.258	1780	688.2	0.000	3203.3
2 (G2,G3)	3.802	1110	688.2	0.000	119.7
3 (G1,G3)	2.822	1220	688.2	0.000	79.0
4 (G3)	0.118	550	550.0	0.163	2.1
5 (G1,G2)	1.862	1230	688.2	0.000	53.4
6 (G2)	0.078	560	560.0	0.100	1.7
7 (G1)	0.058	670	670.0	0.011	0.8
8 (-)	0.002	0	0.0	0.014	0.0

*: EUPと社会厚生は期待値、**:()内は各状態で運転可能な発電機で、状態1が健全状態である。

図4 信頼度基準の変化による社会厚生の影響
(停電回避重視ケース、発電機数3台)

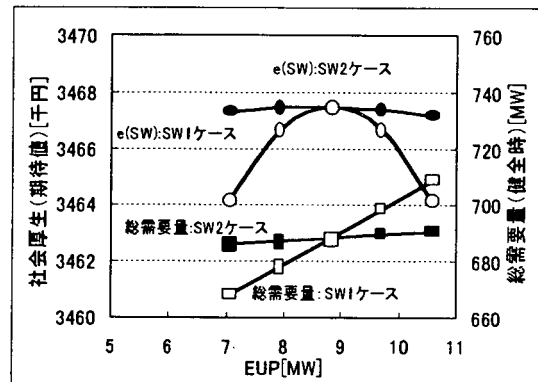
する。これは、事故後の需給均衡量が、その時に運転可能な発電機の下で社会厚生を最大とする量でもあるため、健全時との需要量との格差は前述の停電回避重視ケースよりも拡大するものの、停電時の各系統状態での社会厚生の格差が縮小するためである。

EUP制約の水準 (EUP_R) を変化させた場合には、図5に示すように、前述のケースと同様の傾向にある。ただし、健全時・事故時の両方で信頼度調整を行った場合 (SW2ケース) は、社会厚生ではEUP制約値の変化を大きく受けない。これは、本研究で想定したEUP制約は、事故前後の需要量の格差 (= 負荷遮断量、停電量) を減少させるために、健全時の市場内の取引量を抑制し、事故時の取引量を増加させる働きをする。各状態間で、停電コストの費用分担を行えば、信頼度基準の変更に対する社会厚生への影響は小さくなる。

表2 各系統状態での供給量・社会厚生ならびにEUP
(社会厚生最大化ケース、発電機数3台)

状態**	発生確率 (%)	最大発電量 (MW)	供給量 (MW)	EUP* (MW)	社会厚生* (千円)
1 (G1,G2,G3)	91.258	1780	688.2	0.00	3203.3
2 (G2,G3)	3.802	1110	599.7	3.37	122.3
3 (G1,G3)	2.822	1220	579.9	3.06	81.8
4 (G3)	0.118	550	392.9	0.35	2.5
5 (G1,G2)	1.862	1230	597.8	1.68	54.6
6 (G2)	0.078	560	437.5	0.20	1.8
7 (G1)	0.058	670	428.6	0.15	1.1
8 (-)	0.002	0	0.0	0.01	0.0

*: EUPと社会厚生は期待値、**:()内は各状態で運転可能な発電機で、状態1が健全状態である。

図5 信頼度基準の変化による社会厚生の影響
(社会厚生最大化ケース、発電機数3台、EUP制約値は最経済状態のEUP (0.289) の0.8~1.2倍の水準)

一方、健全時のみでEUP制約を満足するように需給調整を図った場合 (SW1ケース)、信頼度基準の変更による影響が、SW2ケースよりも大きくなる。需要家にとって見れば、信頼度基準の緩和により市場価格が低下し需要量が増加するが、基準が厳しくなると価格が上昇するので需要量を抑制してしまう。両者の調整方法の比較から、発生する可能性のある発電機事故を想定して、予防制御的に需給調整を行うかどうかにより、市場への影響が異なることが分かる。

なお、EUPは、事故確率と停電量 (不足電力) の積で定義される。したがって、供給信頼度調整には、本章で述べたような需給調整による停電量の調整と、系統内に接続する発電機の台数などハード的に決まる事故確率の調整による2種類の方法が考えられる。図4、5に示す曲線の頂点の位置は、ハード的な対応により決まるも

のである。発電事業者の参入が自由な電力市場では、両者の調整項目（事故確率と停電量）を考慮し、要求される信頼度レベルの評価を行うことが必要である。

5. まとめと今後の課題

本稿では競争的電力市場のもとで適正な供給信頼度レベルを議論する枠組みを考察するとともに、検討課題を明らかにした。社会厚生を最大化は最も基本となる考え方であり、そのためには様々な要素的研究が重要である。電力市場のもとでの信頼度評価に関わる主な課題としては次のようなものあげられる。

- ・競争環境下での適正信頼度レベルの具体的評価手法：このためには信頼度レベルと効用の関係など、評価に必要な基礎的要素の検討から開始することが必要である。
- ・社会厚生最大化の観点からの信頼度別供給の評価と実現方策：電源の信頼度レベルに応じた初歩的な供給から系統制御や貯蔵等を含む高度な供給など様々な段階の想定⁹⁾。
- ・信頼度確保に関する短期、長期両視点の融合：今後、既存設備の稼働率向上に重点が置かれる傾向が強まり、長期的には、ある時点での急激な信頼度低下の危険性を孕む。短期・長期の信頼度を効率的に評価する手法の重要性が高まる。系統余力の概念¹⁰⁾はそのひとつの指標と考える。
- ・新しい系統対策と信頼度維持のためのメカニズム：柔軟性の高い新しい系統増強対策と増強実施のための経済的メカニズムの理論構築。

上記は基本的に確率論的な信頼度評価を前提としている。しかし、実際には確定論的手法の中に確率論的考え方を導入していくのが現実的であり、そのための手法の開発も重要な課題である。

競争環境の進展により、信頼度の制御手段が従来は原則的に供給側にしかなかったのに対して、

消費者側にもその手段を与える可能性がある。ただ、現状では無停電装置等への投資など限られたものであるため、消費者が自らリスク管理を行うために、金融市場におけるリスクヘッジのような手法をフォローする市場の創設が望まれるものと考えられる。そのために、Ancillaryサービス市場のような新たな市場設計、新しい取引形態や料金算定基準を検討する必要がある。

本稿では、短期電力市場（運用レベル）に重点をおいて、供給信頼度基準の変更にもなう社会厚生や市場での取引量への影響について検討した。

今後、効率的で公平な電力市場の実現に向けて、長期的な経済合理性も考慮した競争環境における供給信頼度の評価手法、さらに、送電系統の運用・計画も含めた信頼度維持方策とその費用負担ルールについて検討していきたい。

【参考文献】

- [1] "RELIABLE POWER: Renewing the North American Electric Reliability Oversight System," Electric Reliability Panel, Dec. 1997.
- [2] "A Review of Transmission Security Standards," NGC, Aug. 1994.
- [3] 「電力流通設備の新時代の扉を開く」、資源エネルギー庁編、1998.3.
- [4] 例えば、M. J. Sullivan, et al., "Interruption costs, Customer Satisfaction and Expectation for Service Reliability" IEEE, Vol11, No2, pp989-995, 1996,
- [5] 豊田、斎藤：「多数のプレーヤが共存する電力システムの信頼度評価」PSE-99-76, 1999.
- [6] A. M. Spence, "Monopoly, quality, and regulation," Bell Journal of Economics, Vol.6, No.3, pp417-429, 1975.
- [7] 岡田、浅野「新規参入者による送電網混雑を考慮した送電料金設定方式」電気学会論文誌 B（電力・エネルギー部門誌）、Vol119-B, No.12, 1999.
- [8] 岡田、浅野、新岡、横山「IPP 導入の系統運用および供給信頼性への影響分析」電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会、1998.
- [9] 松川：「プライオリティサービス」電中研報告 Y90004, 1990.
- [10] 栗原、高橋「電力系統の輸送力評価」電中研報告 T91062, 1992.

付録1 停電時の平均社会厚生への補足

本文中では、式の展開の見通しをよくするために、停電時の平均社会厚生という概念を用いた。これは個々の停電時の社会厚生をそれぞれの事故確率で計算して集計化した場合と同じである。本文の第3.2節の(13)式の停電による消費者余剰CSの期待変分は以下のように展開できる。

$$\begin{aligned}\theta\Delta CS &= \theta\Delta U - \theta\Delta E \\ &= [\theta U^N - \sum_i \theta_i U^{OUT(i)} \\ &\quad - [\theta E^N - \sum_i \theta_i E^{OUT(i)}] \quad (\text{付1-1}) \\ &= [\sum_i \theta_i U^N - \sum_i \theta_i U^{OUT(i)} \\ &\quad - [\sum_i \theta_i E^N - \sum_i \theta_i E^{OUT(i)}]\end{aligned}$$

ここで以下のような各停電事故時の消費者余剰の変分 $\Delta CS^{(i)}$ を導入すると

$$\begin{aligned}\Delta CS^{(i)} &= CS^N - CS^{OUT(i)} \\ &= (U^N - E^N) - (U^{OUT(i)} - E^{OUT(i)}) \quad (\text{付1-2}) \\ &= (U^N - U^{OUT(i)}) - (E^N - E^{OUT(i)}) \\ &= \Delta U^{(i)} - \Delta E^{(i)}\end{aligned}$$

となる。さらに、(13)式第2項の消費者余剰の期待変分は、

$$\theta\Delta CS = \sum_i \theta_i \Delta CS^{(i)} \quad (\text{付1-3})$$

と書き換えられる。第3項の $\theta\Delta PS$ についても同様に定義できる。したがって、これを用いると第3.2節の(13)式は、次式のように展開することができる。

$$\begin{aligned}C^N + \theta\Delta CS + \theta\Delta PS \\ &= C^N + [\theta CS^N - \sum_i \theta_i CS^{OUT(i)} \\ &\quad + [\theta PS^N - \sum_i \theta_i PS^{OUT(i)}] \quad (\text{付1-4}) \\ &= C^N + [\sum_i \theta_i CS^N - \sum_i \theta_i CS^{OUT(i)} \\ &\quad + [\sum_i \theta_i PS^N - \sum_i \theta_i PS^{OUT(i)}]\end{aligned}$$

つまり、(13)式は健全時の費用と各停電事故時の消費者余剰と生産者余剰の変化を個々の事故確率で評価したものの和である。

$$C^N + \sum_i \theta_i (\Delta CS^{(i)} + \Delta PS^{(i)}) \quad (\text{付1-5})$$

付録2 発電機ならびに需要家の諸特性

付表1 発電機の諸特性

	発電費用関数(*)			Max	Mini	FOR
	Ag	Bg	Cg			
G1	0.0055	11.0	200	670	201	0.04
G2	0.007	9.5	240	560	168	0.03
G3	0.009	9.0	210	550	165	0.02

(*)：発電機費用関数は、次式の2次形式を想定した。

$$C_i(G_i) = A_{gi} \times G_i^2 + B_{gi} \times G_i + C_{gi}$$

Max：発電機出力上限制約[MW]、Min：下限制約[MW]、FOR：発電機の事故発生確率[%]

付表2 需要家の諸特性

	需要家便益関数(*)		
	Ad	Bd	Cd
D1	-0.015	20.0	200
D2	-0.015	20.0	200
D3	-0.015	20.0	200

(*)：需要家の便益関数は、次式の2次形式を想定した。

$$B_i(D_i) = A_{di} \times D_i^2 + B_{di} \times D_i + C_{di}$$

おかだ けんじ

電力中央研究所 経済社会研究所

くりはら いくお

電力中央研究所 狛江研究所

わたなべ なおふみ

電力中央研究所 経済社会研究所