特別高圧需要家の信頼度・電力品質評価システムの開発

——ファジィ推論を用いた停電コストの算定——

学生員 吉野 純* 正員 北 裕幸*
 正員 田中 英一* 正員 長谷川 淳*
 正員 久保 宏** 正員 世永 茂**

Reliability and Power Quality Evaluation of High-Voltage Supplied Customer ——Estimation of Outage Cost by Fuzzy Reasoning——

Jun Yoshino*, Student Member, Hiroyuki Kita*, Member, Eiichi Tanaka*, Member, Jun Hasegawa*, Member, Hiroshi Kubo**, Member, Shigeru Yonaga**, Member

Recently, a number of electric consumers have concerned about the reliability of electricity to be served. For example, some consumers need the electricity with a higher reliability by the automation of manufacturing processes. On the other hand, some consumers need the electricity of a cheaper price even if the reliability becomes a little worse. Under such circumstances, it is necessary that power suppliers evaluate the needs of every consumers precisely and propose the most desirable measures for meeting their requirements. This paper develops a tool to analyze the reliability for high-voltage supplied consumers quantitatively. Further, this paper presents a method for evaluating the outage cost of consumers to help them choose the most appropriate measures for maintaining the reliability. The proposed method applies the fuzzy reasoning approach. The validity of the proposed method is ascertained through some numerical simulations.

キーワード：停電コスト，ファジィ推論，供給信頼度，特別高圧需要家

Keywords: outage cost, fuzzy reasoning, power supply reliability, high-voltage supplied customer

1. はじめに

近年，需要家の電力品質に対する関心が高まりつつある。この背景には生産工程の高度な自動化や IT 機器の普及拡大などに伴い，一部需要家が求める電力品質の基準がこれまでより高くなってきたこと，近年世界的に展開されている電気事業の規制緩和に伴う供給信頼度への影響⁽¹⁾などが挙げられる。一方で，現状の電力供給の信頼度は必要以上に高水準であるとの意見もあり，電力品質が多少劣化したとしても，電気料金の低廉化を望む需要家も少なくない。このような背景から，個別需要家のニーズを把握した上で，

適切な電力供給形態を構築することがより一層求められている。そのためには，需要家内部の個々の負荷ごとに電力品質の実状を定量的に把握し，ニーズに則した適切な対応策を講じる必要がある。対応策としては，図 1 に示すように電気事業者側変電所から需要家までの事業者側の系統自体の増強（予備線の敷設や送配電線の多重化など），非常用電源の設置あるいは構内系統に予備線を敷設するなどの需要家側での対策，さらにはそれらの複合対策が考えられる⁽²⁾。そのため，電気事業者の系統だけでなく，需要家の構内系統までも含めた対応策の発案，ならびにその効果の定量的な評価が必要となる。

以上のような背景から，本研究では電力品質に関する種々の項目（瞬低，供給信頼度など）のうち供給信頼度に焦点を当て，特別高圧需要家の構内系統を考慮した供給信頼度解析手法の開発，ならびに供給信頼度の改善策を容易に比較・検討可能な汎用性の高い評価システムの開発を行っている。なお，著者らは瞬低に関しても同様の研究を行っており，それについては文献(3)を参照されたい。

本論文では開発した評価システムの概要について述べる

* 北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻
 〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目
 Division of Systems and Information Eng., Graduate School
 of Eng., Hokkaido University
 N13-W8, Kita-ku, Sapporo 060-8628

** 北海道電力（株）
 〒060-8677 札幌市中央区大通東 1 丁目 2 番地
 Hokkaido Electric Power Co., Inc.
 Odori-E1-2, Chuo-ku, Sapporo 060-8677

図 1 信頼度向上対策の例

Fig. 1. Measures for improving the reliability.

と共に、需要家に対するコンサルティング活動への適用を念頭におき、ファジィ推論を用いて停電コストを算出する手法を提案する。評価システムおよび提案手法の有効性は、実際の特別高圧需要家への適用結果を用いて検証されている。

2. 信頼度評価システムの概要⁽⁴⁾

2.1 信頼度解析手法⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 本評価システムでは、電気事業者側の特別高圧以下の系統および需要家構内の系統(図1の点線で囲まれた範囲)を対象としており、需要家構内の個々の負荷ごとに対して詳細な信頼度解析が可能である。信頼度解析の手法としては、時系列モンテカルロ法を採用している。本手法は、各設備の事故・故障などの確率事象や負荷需要の変動、さらには予備線・非常用電源などによる供給支障の復旧動作などを自然な形で柔軟にモデル化でき、時間的に矛盾もないことから計算指標の精度が高い。また、その柔軟性の高さから、今後需要家への導入が期待されるコージェネレーションシステムやNAS電池システムなど、季節や時間帯により運転状況が変化する電源を非常用電源として考慮する場合でも、容易に適用可能であるメリットがある。

信頼度解析手法の流れについて、図2に示すフローチャートに沿って以下に説明する。

(1) 系統状態設定 まず、乱数を用いて確率変数の状態遷移を模擬し、系統状態の設定を行う。具体的には、一定の時間ステップごとに、系統中の事故・故障の対象となる設備(配電線、開閉器、変圧器など)に関して、計算機で生成した疑似一様乱数と各設備の故障率から故障状態・健全状態を模擬し、各時間の系統状態を設定する。各設備の故障率は最小単位時間あたりの故障発生回数の期待値を用いる。例えば、年間あたり0.1回の確率で故障する設備

図 2 信頼度解析手法フローチャート

Fig. 2. Flow chart of proposed method.

の1時間あたりの故障率は $0.1/8760$ とする。各設備の故障発生後の扱いについては、故障発生の時点で該当設備が系統から切り離されるものとし、各設備の修理時間が経過したのち健全状態に復帰し、再び系統中へ接続されるものとして扱う。

(2) 故障設備の有無、供給支障発生の判定 故障設備が発生した際、該当設備が系統から切り離された影響により、負荷に供給支障が発生していないかを判定する。与えられた系統構成データから、負荷と電源側との接続状況を確認し、電源側からの供給ルートが絶たれた負荷が存在すれば供給支障が発生したものとする。また、供給支障量を求めるため、年間の電力需要データから供給支障の発生した月・時間帯に応じて各負荷の電力需要を算出する。その際、電力需要の確率的変動に関しては、与えられた標準偏差の値から正規分布乱数を用いて模擬する。

(3) 非常用電源の運転、予備線切替操作 供給支障が発生した場合、可能な限りの復旧動作を全て実行し、供給支障負荷の解消をシミュレーションする。非常用電源が存在していれば、非常用電源の運転により供給支障の解消が可能かどうかを確認する。また、予備線が存在する場合は、全ての予備線に対して切替操作を行い、供給支障の解消が可能かどうかを確認する。これらの復旧動作を実行した場合でも、非常用電源の運転開始・切替までに要する時間や予備線の切替操作に伴う時間分の供給支障は発生するものとする。非常用電源の供給電力が供給支障負荷分に対して不足している場合は、与えられた優先順位データを基

に、重要負荷を優先して供給支障の解消を行う。なお、容量制約のある設備に関しては容量制約のチェックも行い、容量制約を超えない範囲でこれらの復旧動作を実行する。例えば、図 1 で示した需要家構内系統を例にとると、変圧器 2 が故障状態となった場合、予備線切替による負荷 C の供給支障解消は、予備線や変圧器 1 の容量制約を超えない範囲で行われる。

(4) 供給支障量の計算 全ての復旧動作を実行してもなお供給支障負荷が存在する場合、その供給支障量を負荷ごとに計算・累積する。供給支障量は時系列のシミュレーションにより年間を通して算出されるため、電力需要の季節変動や日間変動は必ずと考慮される。そのため、電力需要の多い夏季の昼間は容量に余裕が無く 1 設備事故が大規模な供給支障に発展しやすい、電力需要の少ない夜間の供給支障は小容量の非常用電源でも補償できる、といった事象も考慮可能となり、より実情に即した信頼度評価を行うことができる。

(5) 信頼度指標の算定 以上の計算を単位ステップ時間（本システムでは 15 分としている）ごとに数千～数万年分行うことで、下記に示す供給信頼度指標（供給支障量の年間期待値）を算出する。なお、ここでいう数千～数万年とは、統計上の母集団を増やすために 1 年分の計算を数千～数万回繰り返すことを意味しており、年数の経過に伴う設備の老朽化などは考慮していない。モンテカルロ法においては、計算指標の精度を高めるためにより多くの年数分のシミュレーションを行う必要がある。

- 供給支障頻度 (EFNS) [回/年]
- 供給支障時間 (EDNS) [h/年], [h/回]
- 供給支障電力 (EPNS) [kW/年], [kW/回]
- 供給支障電力量 (EENS) [kWh/年], [kWh/回]
- 設備コスト [¥/年]
- 停電コスト [¥/年]

各信頼度指標のうち供給支障時間・供給支障電力・供給支障電力量に関しては、年間あたりの期待値に加えて停電 1 回あたりの期待値についても算出する。また、信頼度指標以外の指標としては、需要家構内の各設備のコストを累積し、需要家全体での年間あたりの設備コストを算出する。さらに、供給支障による損害をコストに換算した停電コストも算出する。停電コストの算出手法や、算出にあたり必要な入力データに関しては、3 章で詳しく述べる。

2.2 入力データ 本評価システムにおいては、供給信頼度を需要家の実情に即して詳細に評価する目的から、系統構成、予備線・非常用電源の有無、設備故障や容量制約、各負荷の電力需要などに関するデータを入力する必要がある。これらのデータは、本システムの入力データ作成ツールにより、グラフィカル・ユーザー・インターフェース (GUI) を介して容易に入力・編集することができる (図 3 参照)。そのため、系統構成や各パラメータ値を変更しての信頼度評価が容易に試行可能であり、想定される様々な信頼度向上対策の中から最適な対策を効率よく探索すること

図 3 評価システム画面例

Fig.3. Screen shot of the tool.

が可能である。

各入力データについて以下に説明する。

(1) 系統データ

- 系統構成図 … 電気事業者側、需要家側の系統構成図を画像データ (Windows, BMP 形式) として与える
- 各設備の座標 … 各設備 (配電線、開閉器、変圧器、非常用電源など) の系統構成図中における座標値を与える
系統中の各設備相互の接続状況や故障設備による影響範囲は、コンピュータのグラフィック画面上で画像データを直接処理することで自動認識される。そのため、各設備の接続状況に関するデータや Fault Tree データ (各機器の故障の影響範囲を記したデータ) などを与える必要はない。

(2) 設備データ

- 故障率 [回/年] … 各設備の年間あたり故障発生回数の期待値
- 修理時間 (MTTR) [h] … 各設備が故障してから復旧するまでに要する平均修理時間
- 容量 [kV·A], [kA] … 各設備の耐容量
- 設備コスト [¥/年・基] … 各設備 1 基あたりの年間設備コスト (耐用年数、維持費、減価償却費、年経費率なども考慮したコストとする)

(3) 予備線データ

- 切替時間 [h] … 予備線切替の際に必要な時間を予備線ごとに与える

(4) 非常用電源データ

- 起動時間 [min] … 非常用電源が運転を開始し、負荷への電力供給が可能となるまでに要する時間
- 供給可能電力 [kW], 電力量 [MWh] … 非常用電源の発電可能電力および電力量
- 運転コスト [¥/kWh] … 非常用電源の運転に伴う燃料費など (運転コストは累積され、非常用電源の設備コストとして計上される)
- 対象負荷の座標 … 非常用電源による電力供給の対象となる負荷を座標値で指定する

以上のパラメータから、電源の種類による違いも考慮可能である。例えば、二次電池やフライホイールを用いる電源は起動時間、運転コストはほぼ0であるが、供給可能電力・電力量は小さくなる。一方、ディーゼルエンジンなどを用いる電源は起動時間、運転コストがある程度必要となるが、供給可能電力・電力量は大きくなる。

(5) 負荷データ

- 年間電力需要 [kW]… 負荷の各時間の消費電力 (有効電力) を各月ごとに平均した値を標準偏差の値とともに与える
- 平均力率… 負荷の年間の平均力率を標準偏差の値とともに与える
- 負荷の優先度… 非常用電源の発電電力が不足した際に供給する負荷の優先順位を与える (優先度は3段階で指定可能)

3. ファジィ推論を用いた信頼度評価

3.1 停電コスト 信頼度解析により出力される供給信頼度指標は、供給支障頻度・供給支障時間・供給支障電力など多岐にわたっており、各指標が示す値の意味・特徴も様々である。そのため、需要家の全体としての信頼度水準はどの程度なのか、そしてそれは需要家の要求水準をどの程度満たしているか、などを一概に論じることは難しい。また、信頼度向上対策が必要な場合、どの程度の対策が必要なのか、どのような対策が需要家にとって最適なのか、といったことが需要家・コンサルタント側双方にとって把握しづらいと考えられる。そこで、新たに経済的視点からの指標として、停電コスト (供給支障による損害をコスト換算したもの) を算出することにする。なお、停電コストは他の各指標と同様に年間あたりの期待値として定義する。停電コストを用いることで、算出された信頼度が需要家の要求水準をどの程度満たしているかについて、経済的視点からも評価可能になるほか、停電コストの減少分と設備コストの増分とを比較することで、信頼度向上対策の費用対効果も容易に求められる。

停電コストの算出手法としては、単位時間あたりの損失額 (停電単価 [¥/h]) や単位供給支障量あたりの損失額 (停電単価 [¥/kWh]) を用いて計算する方法が一般的であり、需要家へのアンケート調査や経済マクロ評価による算定から、これらの停電単価の値を実際に推定している文献もある (文献 (7) など)。また、停電時間と損失額との関係が一定にならない需要家に対しては、図 4 のように、停電の時間・大きさと損失額との関係をパターン化し、それらの損失パターンから停電コストを算出する手法なども考えられる。しかしながら、需要家によっては停電単価や損失パターンに対する認識が曖昧で、それらを明確に定めることは難しい場合も考えられる。そこで本研究では、メンバーシップ関数・ルールにより停電単価や損失パターンに対する認識を取り込み、供給信頼度を定量的に示す信頼度指標の値から、ファジィ推論により停電コストを算出する手法を提案

図 4 停電の損失発生パターン例

Fig. 4. Relationships between damages and outage.

図 5 停電コスト算出のイメージ

Fig. 5. Overview of proposed method.

する。

3.2 ファジィ推論による停電コストの算出 ファジィ推論の適用にあたり、供給信頼度指標および停電コストに関するメンバーシップ関数・ルールを設定する。具体的には、各信頼度指標の水準を「高水準 (Good)」、「中水準 (Middle)」、「低水準 (Bad)」の3段階に分割し、需要家にとってそれぞれの帰属度を示すメンバーシップ関数を設定する。停電コストに関しても同様に、「安い (Low)」、「中程度 (Middle)」、「高い (High)」の3段階に分割し、それぞれの帰属度を示すメンバーシップ関数を設定する。その上で、需要家にとって各信頼度水準と停電コストとの間で成り立つと考えられる関係をルールとして設定する。

以上のように設定されたメンバーシップ関数・ルールに基づき、供給信頼度指標の値を用いてファジィ推論を行い、その合成解を停電コストとして算出する。合成解を求める手法としては Min-Max 合成法⁽⁸⁾を用いる。図 5 は本手法による停電コスト算出のイメージを示したものである。

精度よく停電コストを算出するためには、需要家の業種・実状・ニーズなどを綿密に調査し、それらを的確に反映したメンバーシップ関数・ルールを設定する必要がある。そのための方法としては、コンサルタント側が需要家に対してアンケート調査を行い、信頼度指標と停電コストとの関係のある程度明確化する、算出された停電コストと需要家の過去の被害額実績値とを比較し、必要に応じてメンバーシップ関数・ルールの修正を行う、などが考えられる。ま

図 6 メンバシップ関数の入力形式

Fig. 6. Input form of membership functions.

た、いくつかの典型的な需要家業種に対してメンバーシップ関数・ルールを予め設定しておき、必要に応じて最適なものを需要家側が選択する、などの方法も考えられる。以上の点に関しては、今後検討すべき点であるといえる。

3.3 メンバシップ関数・ルールの入力形式 本手法における、メンバーシップ関数・ルールの入力形式について説明する。図 6 に示すように、メンバーシップ関数は線形近似されたものとし、 a, b, c, d, e, f, g, h の各値をパラメータとして入力することでメンバーシップ関数を設定する（ただし $a \leq b < c \leq d < e \leq f < g \leq h$ ）。ルールに関しては、ルール表の各欄を停電コストと各水準との関係に対応づけて入力することで設定する。ルール表の各欄は、必ずしも全て入力される必要はなく、停電コスト算出の際需要家にとって特に意味のないルールなどに関しては、空欄にしても差し支えない。

4. 供給信頼度の試算例

4.1 評価モデル 実際の特別高圧需要家に本システムを適用し信頼度指標の試算を行った。図 7 に適用した需要家の系統構成図を示す。系統構成図中の各ボックスは

需要家構内の各負荷に相当する。規模は 10MW 程度であり、一般的な特別高圧需要家と同様、電気事業者側系統から 66 kV 受電を行い需要家構内の変電所で 6 kV に降圧、各負荷へ電力を供給する系統構成となっている。非常用電源は存在しないが大部分の負荷に予備線が接続されており、供給支障が発生した場合でも、予備線切替による短時間での復旧が可能である。各設備の入力データ（故障率、修理時間、容量、予備線切替時間など）は適宜妥当と考えられる値を入力した。電気事業者側系統は 1 回線供給方式を想定した。

4.2 現状における信頼度指標の試算結果 適用需要家の各負荷のうち、供給支障頻度（EFNS）、供給支障時間（EDNS）、供給支障電力（EPNS）について、負荷#1～負荷#10の現状における試算結果を図 8 に示す。供給支障頻度に関しては、各負荷と比較して負荷#9 が最も小さく、負荷#2 が最も大きな値となっているが、これは需要家構内の変電所・負荷間の距離の違いによる影響が大きい（例えば配電線長は負荷#9: 0.1 km、負荷#2: 1.1 km）。電源-負荷間で経由する設備が多くなるほど経路全体でみた故障率が高くなり、供給支障発生回数が多くなる傾向があるといえる。供給支障時間に関しては、予備線の有無による影響が顕著に表れている。例えば、負荷#8、負荷#9 は予備線が接続されていないため、供給支障発生時において予備線切替による短時間復旧が見込めず（故障設備の修理時間が経過するまで供給支障が継続してしまう）、他の負荷と比較して供給支障時間が大幅に長くなっている。供給支障電力に関しては、各負荷の規模（電力需要の大きさ）に

図 7 適用需要家の系統構成図

Fig. 7. System configuration of the assumed customer.

図 8 信頼度指標試算結果 (1)

Fig. 8. Reliability indices (1).

図 9 試算結果画面例

Fig. 9. Screen shots of evaluation results.

よる影響が大きい。例えば、負荷#1, 負荷#2, 負荷#6などは比較的大規模な負荷であるため、供給支障電力も大きくなっている。一方、負荷#4, 負荷#8, 負荷#9などは比較的小規模な負荷であり供給支障電力は小さい。なお、設備容量に余裕がない場合は、電力需要のピーク時に供給支障がより発生しやすくなるため、供給支障電力が大きくなる傾向があるが、今回の適用需要家は各設備の容量に十分余裕があるため、そのような影響はみられない。

これらの試算結果は系統構成図上に直接グラフ表示が可能で、系統構成と信頼度との関係が容易に把握できるほか、出力データは CSV 形式となっており、表計算ソフトなどを用いた解析・グラフ表示も可能である(図 9 参照)。

4.3 信頼度向上対策を実施した場合における信頼度指標の試算結果 適用需要家の各負荷のうち、負荷#8, 負荷#9, 負荷#10 の信頼度を向上させるため以下のような対策を実施したものと想定し、信頼度指標の試算を行った。

(1) 負荷#8, 負荷#9 間に予備線を敷設(図 10 左参照) 負荷#8, 負荷#9 の信頼度向上を目的として、両負荷間に予備線を敷設する。母線事故や両負荷同時の供給支障が発生しない限り互いに電力融通が可能であり、供給支

図 10 想定する信頼度向上対策

Fig. 10. Assumed measures for improving the reliability.

図 11 信頼度指標試算結果 (2)

Fig. 11. Reliability indices (2).

障時間の大幅な短縮が期待できる。

(2) 負荷#10 へ非常用電源の設置(図 10 右参照) 負荷#10 は現状でも比較的信頼度は高いといえるが、更なる信頼度向上を目指し、非常用電源を設置する。電源の種類としては、ディーゼルエンジンを用いたものを想定した。

試算結果を図 11 に示す。負荷#8, 負荷#9 はともに供給支障時間(EDNS)が他の負荷とほぼ同等レベルまで短縮され、予備線敷設による信頼度向上効果が顕著に表れている。負荷#10 は供給支障時間がさらに短くなっており、非常用電源の設置により非常に高い信頼度が得られるといえる。また、負荷#4 も供給支障時間が若干短くなっているが、これは負荷#4 も非常用電源による電力供給の対象としており(ただし優先度は負荷#10 の方を高く設定)、非常用電源の供給電力に余裕がある場合は、両負荷間に接続された予備線を經由して負荷#4 へも電力供給が行われるためである。

なお今回は、各設備のコストに関するデータが得られなかったため、設備コストは算出していないが、コストのデータを得ることにより予備線や非常用電源の導入に伴う需要家の設備コスト変化が算出され、信頼度向上効果や停電コストなどとの比較により、各対策のメリットがコスト面からも把握される。また、今回は想定していないが、需要家側の対策だけでなく、特別高圧側系統の 2 回線化など、電気事業者側系統での対策も考慮可能である。電気事業者側の系統事故による影響は、需要家構内全体へ波及すること

から、それらの対策も重要であると考えられる。

以上の結果から、本評価システムの適用により、需要家の供給信頼度が各負荷ごとに定量的に把握できるほか、対策を施した場合における信頼度の向上効果やコストメリットも的確に把握可能であり、その有用性が確認されたといえる。

5. ファジィ推論による停電コスト試算例

5.1 各指標をパラメータとした停電コスト試算例

ファジィ推論を適用した提案手法では、各信頼度指標をパラメータとして与え、繰返しファジィ推論を行うことで、各指標の値と停電コストとの関係をグラフ化し視覚的に把握することも可能である。例として、各信頼度指標のうち供給支障頻度 (EFNS)・供給支障時間 (EDNS)・供給支障電力 (EPNS) の 3 種類をとりあげ、それらの各指標と停電コストとの関係を求めてみる。メンバーシップ関数・ルールは、一般的な需要家を想定してそれぞれ図 12、表 1 のように設定した。ここで想定している一般的な需要家とは、停電の頻度・持続時間・大きさがいずれも小さければ停電の被害は小さく、停電の頻度・持続時間・大きさがいずれも大きければ停電の被害は大きくなる需要家である。3 種類の各指標と停電コストとの関係をグラフ化した例を図 13 に示す。

今回とりあげた 3 種類の指標は、停電を特徴づける 3 要因である停電の頻度・持続時間・大きさに最も端的に対応

することから、ファジィ推論により停電コストを算出する上で有効な指標であるといえる。もちろん、これら 3 種類の指標だけでなく、他の指標を加えてのファジィ推論や、これら 3 種類の指標のうち需要家にとって不必要と思われる指標があれば、それらを除いてのファジィ推論も可能である。

図 13 のグラフにより、停電コストに影響を与えている信頼度指標の把握や、停電コストを低減させる上で、より効果的な対策の予想などへの活用が期待される。例えば、図 14 は図 13(a) のグラフを真上から見た停電コストの等高線に相当するグラフであるが、ある需要家 (EPNS: 200 [kW/y] 程度) の停電コストが P 点であるとき、その需要家の停電コストを減少させるためには①～③の矢印で示すような信頼度向上対策が考えられる。

① 供給支障時間をより小さくする。

(予備線の敷設、非常用電源の導入などの対策をする)

② 供給支障頻度をより小さくする。

(より故障率の低い設備への変更などの対策をする)

③ 供給支障頻度・供給支障時間ともにより小さくする。

(①②の複合対策)

こらら①～③の対策は対象とする信頼度指標は異なっているが、停電コストの低減効果としては等しいことがわかる。また、より急な勾配になっている経路が、停電コストをより効率よく下げるための経路に相当するといったことなどを、視覚的に把握することができる。

図 12 メンバーシップ関数 (1)

Fig. 12. Membership functions (1).

表 1 ルール表

Table 1. Rules table.

EPNS: Good		EPNS: Mid.				EPNS: Bad			
		EFNS				EFNS			
		Good	Mid.	Bad		Good	Mid.	Bad	
EDNS	Good	Low	Low	Low		Good	Low	Mid.	Mid.
	Mid.	Low	Low	Mid.		Mid.	Mid.	Mid.	Mid.
	Bad	Low	Mid.	Mid.		Bad	Mid.	Mid.	High
EDNS	Good	Low	Low	Low		Good	Mid.	Mid.	High
	Mid.	Low	Low	Mid.		Mid.	Mid.	High	High
	Bad	Low	Mid.	Mid.		Bad	High	High	High

図 13 各信頼度指標と停電コストとの関係

Fig. 13. Relationships between each index and outage cost.

図 14 図 13(a) における停電コスト減少対策

Fig. 14. Measures to reduce outage cost on Fig. 13(a).

図 15 メンバシップ関数 (2)

Fig. 15. Membership functions (2).

5.2 実際の需要家への適用結果 4章で評価した実際の特別高圧需要家モデルのうち、負荷#1～負荷#7をとりあげ、各信頼度指標の現状における試算結果に対してファジィ推論を適用し、各負荷の停電コストを算出した。

(Case 1) メンバシップ関数・ルールを全負荷共通に設定した場合 負荷#1～負荷#7に対して、メンバシップ関数・ルールを共通に設定した場合について停電コストを試算する。設定したメンバシップ関数・ルールはそれぞれ図 15、表 1 である。停電コストの試算結果を図 16 に示す。全般的に各指標の値が小さい(供給支障量が小さい)負荷は停電コストも小さく、各指標の値が大きい(供給支障量が大きい)負荷は停電コストも大きくなっていることから、ルールに従った妥当性のある結果が得られているといえる。負荷#4は、負荷#5や負荷#7と比較して供給支障量が若干大きくみえるにもかかわらず、試算された停電コストは最も安くなっているが、これは負荷#4の供給支障電力(EPNS)が他の負荷と比較して小さいために、停電コストを安く評価するルールがファジィ推論過程でより大きく反映された結果である。

(Case 2) メンバシップ関数・ルールを負荷によって変化させて設定した場合 (Case 1)ではメンバシップ関数・ルールを全負荷共通として停電コストを試算した。ここでは、負荷#1～負荷#4は他の負荷とは異なった性質の負荷であると想定して、メンバシップ関数・ルールを再設定し停電コストを試算する。以下に各負荷に対して想定する性質について説明する。

図 16 停電コスト試算結果 (1)

Fig. 16. Outage cost (1).

表 2 ルール表 (時間比例型)

Table 2. Rules table (Proportional-to-time load).

		EPNS: Good			EPNS: Mid.			EPNS: Bad		
		EFNS			EFNS			EFNS		
		Good	Mid.	Bad	Good	Mid.	Bad	Good	Mid.	Bad
EDNS	Good	Low	Low	Low	Good	Low	Low	Good	Low	Low
	Mid.	Mid.	Mid.	Mid.	Mid.	Mid.	Mid.	Mid.	Mid.	Mid.
	Bad	High	High	High	Bad	High	High	Bad	High	High

図 17 メンバシップ関数 (高品質型)

Fig. 17. Membership functions (important load).

(a) 時間比例型 (負荷#1, 負荷#2): 停電の頻度(供給支障頻度)・大きさ(供給支障電力)に関係なく、停電の継続時間(供給支障時間)のみが停電コストに影響を与えると考えられる需要家負荷。停電時間に比例して営業活動が停止してしまうサービス業などのような需要家負荷が該当すると考えられる。(Case 1)で設定したメンバシップ関数・ルールのうち、ルールを表 2 の時間比例型に変更する。

(b) 高品質型 (負荷#3, 負荷#4): 高い電力品質を要求する需要家負荷。精密機械製造業や金融機関などといった、1回の短時間停電でも莫大な損害が発生する需要家負荷が該当すると考えられる。(Case 1)で設定したメンバシップ関数・ルールのうち、メンバシップ関数を図 17 の高品質型に変更する。

なお、今回(a)の場合はルールを、(b)の場合はメンバシップ関数を変更しているが、これらの使い分けに関する考え方としては、需要家の業種・実状をより反映しやすい

図 18 停電コスト試算結果 (2)

Fig. 18. Outage cost (2).

方法を選択するものとしている。例えば、(a) は停電時間とコストとの関係がより明確でありルールの変更が有効、(b) は信頼度水準に対する要求がより明確であることから、メンバーシップ関数の変更が有効であるといえる。もちろん、需要家によっては、メンバーシップ関数・ルールを共に変更する場合も考えられる。

以上のようにメンバーシップ関数・ルールを変更して停電コストを試算し、(Case 1) と比較した結果を図 18 に示す。負荷#1, 負荷#2 はともに停電コストが安くなっており、供給支障頻度 (EFNS), 供給支障電力 (EPNS) とは関係なく供給支障時間 (EDNS) のみに依存して停電コストが算出されていることがわかる。負荷#3, 負荷#4 はともに停電コストが大幅に高くなっており、高品質型用メンバーシップ関数への変更が大きく反映されていることがわかる。負荷#3, 負荷#4 が高品質型負荷であるなら、比較的供給支障が少ない現状の信頼度水準でも停電による損害は大きく、何らかの信頼度向上対策が必要といえる。

以上の結果から、需要家に応じて適切なメンバーシップ関数・ルールを設定することで、それらはファジィ推論過程で的確に停電コストに反映され、需要家の実状に見合った結果が得られることを確認した。

6. ま と め

本研究では、特別高圧需要家の供給信頼度を定量的に解析する評価システムの開発を行うとともに、解析結果として得られる各信頼度指標を用いてファジィ推論により停電コストを算出し、需要家に対するコンサルティング活動への一助とする手法を提案した。また、実際の特別高圧需要家に本評価システムおよび提案手法を適用し、その有効性について検証した。

今後の課題としては、評価範囲の上位系統側への拡張や、瞬低や電圧変動などの波形品質も含めた評価手法、評価システムの開発などが挙げられる。また、非常用電源として、二次電池やフライホイール、コージェネレーションシステムなどの機器に関しても評価対象とし、より完成度の高い

システムの開発を目指していく。

最後に、本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (B) (課題番号: 15360144) 及び基盤研究 (C) (課題番号: 15560232) の研究助成を受けていることを付記する。
(平成 15 年 5 月 26 日受付, 平成 15 年 10 月 14 日再受付)

文 献

- (1) 電力系統技術委員会:「競争環境下における電力品質」, 電気学会技報, No.925 (2003)
- (2) 電気協同研究会:「特別高圧需要家受電設備」, 電気協同研究, Vol.47, No.5 (1992)
- (3) X. Lang, R. Hara, H. Kita, E. Tanaka, J. Hasegawa, H. Kubo, and S. Yonaga: "Reliability and Power Quality Evaluation of Ultra-High-Voltage Supplied Customer—A study on the Calculation of Voltage Sag Costs—", 2003 National Convention Record IEE Japan, No.6-014 (2003-3) (in Japanese)
郎 旭輝・原 亮一・北 裕幸・田中英一・長谷川淳・久保 宏・世永 茂:「特別高圧需要家の信頼度・電力品質評価システムの開発—瞬低コストの算出に関する検討—」, 平成 15 年電気学会全国大会, No.6-014 (2003-3)
- (4) J. Yoshino, H. Kita, E. Tanaka, J. Hasegawa, H. Kubo, and S. Yonaga: "Reliability Evaluation of Ultra-High-Voltage Supplied Customer", 2002 Proc. of the Thirteenth Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan, A, No.147 (2002-8) (in Japanese)
吉野 純・北 裕幸・田中英一・長谷川淳・久保 宏・世永 茂:「特別高圧需要家の供給信頼度評価システムの開発」, 平成 14 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 分冊 A, No.147 (2002-8)
- (5) I. Kurihara and M. Nagata: "Reliability Analysis of a Trunk Power System —Development of basic logic for adequacy analysis of the power system—", CRIEPI Report, T97063 (1998) (in Japanese)
栗原郁夫・永田真幸:「基幹系統の供給信頼度評価システムの開発—静的供給信頼度解析手法の基本論理の開発—」, 電中研研究報告, T97063 (1998)
- (6) I. Kurihara: "Reliability Evaluation of a Composite Power System —Development of Adequacy Analysis Program—", CRIEPI Report, T98060 (1999) (in Japanese)
栗原郁夫:「基幹系統の供給信頼度評価システムの開発—静的供給信頼度解析プログラムの開発—」, 電中研研究報告, T98060 (1999)
- (7) K. Nakamura and S. Yamashiro: "A Survey Study on Estimation of Customer Interruption Costs", T. IEE Japan, Vol.119-B, No.2, pp.284–290 (1999-2) (in Japanese)
仲村宏一・山城 迪:「停電コストの推定に関する調査研究」, 電学論 B, 119, 2, pp.284–290 (1999-2)
- (8) 例えば, 坂和正敏: ファジィ理論の基礎と応用, 森北出版 (1989)

吉 野 純 (学生員) 1979 年 12 月 26 日生。2001 年 3 月北海道大学工学部システム工学科卒業。同年 4 月同大学大学院工学研究科システム情報工学専攻入学, 現在に至る。主として, 電力系統における電力品質評価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。1989 年 4 月同大学工学部電気工学科助手, 1995 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)。1997 年電気学会論文賞受賞。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。

田 中 英 一（正員）1952 年 8 月 12 日生。1977 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 月同大学工学部電気工学科助手。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に配置換えとなり，現在に至る。主として，電力系統の解析・制御に関する研究に従事。日本 OR 学会，電気設備学会，計測自動制御学会会員。

久 保 宏（正員）1967 年 11 月 4 日生。1993 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 月北海道電力（株）入社。現在，同社工務部電力システムグループに勤務。主として，電力系統の計画業務に従事。

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。1995 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に配置換えとなり，現在に至る。工学博士。1997 年電気学会論文賞受賞。1994 年 B 部門長，1997 年副会長（調査担当）。主として，電力系統の計画・運用・解析・制御および電気エネルギー工学全般に関する研究に従事。IEEE，照明学会，エネルギー資源学会，低温工学協会，日本 OR 学会，電気設備学会等会員。

世 永 茂（正員）1962 年 5 月 7 日生。1986 年 3 月横浜国立大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月北海道電力（株）入社。現在，同社工務部電力システムグループに勤務。主として，電力系統の計画業務に従事。