

費用便益分析による変電設備の耐震補強計画法

朱牟田善治¹ 当麻純一² 石田勝彦³

¹正会員 工修 (財)電力中央研究所 地盤耐震部 (〒270-11 千葉県我孫子市我孫子 1646)

²正会員 工博 (財)電力中央研究所 地盤耐震部 (〒270-11 千葉県我孫子市我孫子 1646)

³ 工博 (財)電力中央研究所 (〒270-11 千葉県我孫子市我孫子 1646)

費用便益分析に基づく変電設備の耐震補強計画法を提案した。まず、費用便益分析の解析ステップについて述べ、耐震補強コスト (Retrofit Cost) とある想定地震に対する企業損失コスト (Company Loss) の評価モデルの構築方法について述べた。つぎに、北海道釧路地域に存在する実際の2次系統に本手法を適用し、同系統の断路器および遮断器を対象とする耐震補強計画について、費用便益の観点から考察した。

Key Words : cost benefit analysis, seismic retrofit, substation facility, electric power system, lifeline, seismic risk management

1. はじめに

現行の変電設備の耐震設計基準は日本電気協会の指針(1980)¹⁾によっており、最近の大地震においてもその妥当性が確認されている。しかし、旧基準の設備において、大きな被害が生じたことから全国の170kV超過の変電機器について、順次、現行基準への改修が実施されている状況にある。ただし、実際の地震時に被害の大きい66kV, 77kVにあたる現行基準に準拠していない変電機器の補強については明確な指針がなく、また170kV超過の機器についてもコストに配慮しながらいずれの機器を補強するのが効果的なのかを評価する手法がこれまでなかった。

本研究は、これらの実務に資するため、変電設備の耐震補強コストと地震時の損失コストとの関係を定量的に評価する費用便益モデルを開発し、費用便益の観点から変電設備の耐震補強計画を検討できる手法を開発することを目的とする。

2. 手法の概要

(1) 基本概念

図-1は、ある想定地震に対する耐震補強コスト (Retrofit Cost) と企業損失コスト (Company Loss) との一般的な関係を示す。補強コストと損失コストはトレードオフの関係にあり、信頼性を高めると損失コストは抑制できるが補強コストがかさむという関係にある。この図に示すよう想定される地震外力に対する耐震補強コストと損失コストのトレードオフの関係を定量的に分析でき

れば、設備計画者のニーズに応じた経済的な耐震補強計画を策定することができる。つまり、決まったコストの範囲内で効果的に信頼性を高めるために補強すべき機器を選別することが可能となる。

(2) 解析ステップの概要

図-2は、提案する手法の解析フローを示す。本手法は3つのステップからなる：

STEP1では、機器の脆弱性とその直下の地盤の地震危険度に基づき、対象とする各機器の想定地震に対する被害確率(P_{fi})を式(1)により算定する：

$$P_{fi} = \int_0^{\infty} f_{Si}(s) \left\{ \int_0^s f_{Ri}(r) dr \right\} ds = \int_0^{\infty} f_{Si}(s) F_{Ri}(s) ds \quad (1)$$

ここで、 $f_{Si}(s)$ は、想定地震により任意の変電機器 i に発生する応力 S の確率密度関数、 $f_{Ri}(r)$ は、ある限界状態の耐力 R の確率密度関数を示す。ただし、 S と R は独立であると仮定する。

STEP2は、STEP1で求めた機器ごとの地震被害確率に基づき、系統全体での供給支障電力期待値を地震時供給信頼性を示す指標として評価する。ここでいう供給支障電力は、式(2)により定義する：

$$Z_j = D_j - S2_j \quad (\geq 0) \quad (2)$$

ここで、 j は想定地震を示し、 Z_j は供給支障電力関数

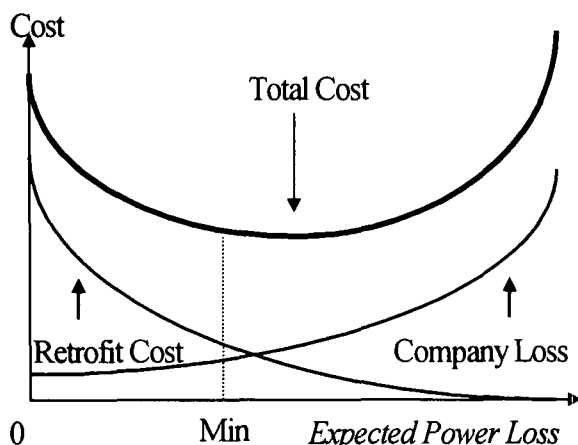


図-1 想定地震に対する耐震補強コスト (Retrofit Cost) と企業損失コスト(Company Loss)の関係

を示す。 D_j は、地震直前の系統の需要電力を示し、 S_{2j} は、物理的な機器の修復をせずに応急復旧が完了した時点での供給可能電力を示す。

本研究では、変電所を構成している母線、断路器、遮断器、変圧器などの変電機器をノードに、リード線をリンクとしてモデル化した変電所モデル (サブネットワークモデル) を構築し、さらに、変電所をノード、送電線をリンクとした系統モデル (メインネットワークモデル) を構築する。これらのモデルを用いて式(2)を確率的に評価するために基幹系統と2次系統を別々に評価する手法を提案した。ここで扱った基幹系統は、ループ状に運用されている電力系統であり、潮流調整の効果を考慮して地震時の供給信頼性を評価する²⁾。2次系統は、放射状に運用されている電力系統であり、系統切り替え操作の効果を考慮してその地震時供給信頼性を評価する³⁾。

STEP3 は、式(4)により定義された費用総額期待値を、後述する考え方に従って決められる優先順位に基づいて行なった耐震補強の各レベルに応じて算定する。

$$\text{Total Cost} = \text{Company Loss} + \text{Retrofit Cost} \quad (3)$$

ここで、Total Cost は費用総額期待値、Retrofit Cost は、耐震補強費、Company Loss は、地震により被る損失期待値をそれぞれ示す。

式(3)で示した Retrofit Cost および Company Loss の算定モデルについて次に示す。

(3) Company Loss (損失期待値)

式(3)で示されている Company Loss を式(4)により定義する：

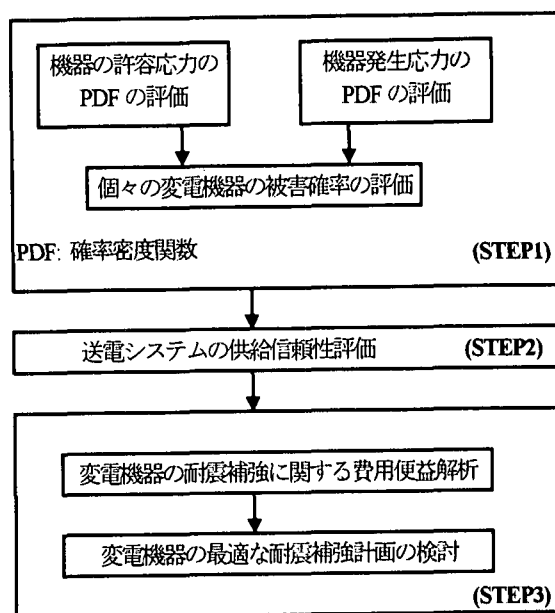


図-2 変電設備に対する耐震補強計画法の解析フロー

$$\begin{aligned} \text{Company Loss} = & \text{Capital Loss} + \text{Revenue Loss} \\ & + \text{Chargeable Cost} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、Capital Loss は、地震により損傷した電力機器の修復総額期待値 (機器の被害総額期待値) を示し、Revenue Loss は、地震で発生した供給支障により生じた収益減少額の期待値を示す。Chargeable Cost は、供給支障が生じたことにより契約需要家に支払わなければならない補償額の期待値を示す。

(a) Capital Loss (機器の修復総額期待値)

機器の修復に要する総額は、式(5)により定義する。

$$\text{Capital Loss} = \sum_{i=1}^n P_{fi} \times (\text{Repair Cost})_i \quad (5)$$

ここで、 i は、対象とする変電機器、 n は、修復の対象となる変電機器数をそれぞれ示す。 P_{fi} は、電力機器 i の地震被害確率を示し、 $(\text{Repair Cost})_i$ は、損傷した機器 i の修復費用を示す。

(b) Revenue Loss (地震が原因となる供給支障により生じた収益減少額の期待値)

地震により被害を受けたことによって生じた供給支障電力量から算出される被害額を式(6)により定義する。

$$\begin{aligned} \text{Revenue Loss} = & \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m \left\{ Z_n \times T_{Rn} \times \int_0^1 f_L(t) dt \right\} \\ & \times \text{Profit Cost / Unit} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 n はモンテカルロ法の各試行、 m は総試行回

数を示す。\$Z_n\$ は、モンテカルロ法の試行 \$n\$ で算定される系統全体の供給支障電力、\$T_{Rn}\$ は応急復旧完了から供給支障が解消するまでの時間を示す。\$f_L(t)\$ は、対象地域 \$L\$ の地震後の経過時間を復旧完了時間で正規化した電力供給支障率を示す。Profit Cost/Unit は、単位電力量あたりの収益コストを示す。なお、\$T_{Rn}\$ と \$f_L(t)\$ は、それぞれ既往の文献⁹⁾や被害事例から地震被害規模や地域ごとに経験的に仮定する。

(c) Chargeable cost (支払われるべき補償額)

Chargeable cost とは、供給支障が生じたことにより電力会社が契約需要家に支払わなければならない補償額を意味する。しかし、日本では、地震時にそのような例が見あたらないことから本研究では、Chargeable cost は、0 と仮定する。

(4) Retrofit Cost (耐震補強コスト) の算定

Retrofit Cost を、式(9)により定義する。

$$\text{Retrofit Cost} = \sum_{i=1}^m (\text{Retrofit Cost})_i \quad (9)$$

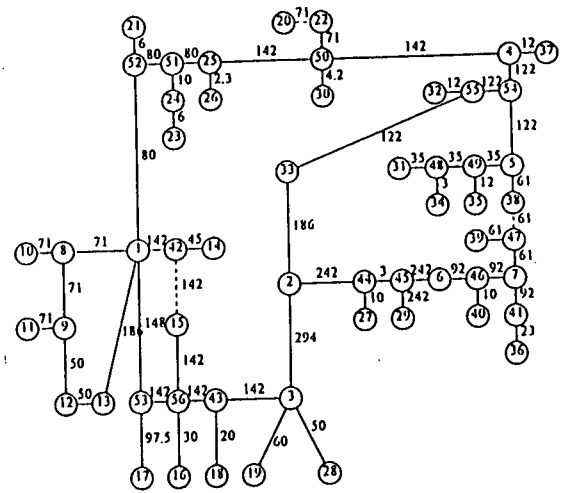
ここで、\$i\$ は耐震補強される機器を、\$m\$ は耐震補強される機器の数をそれぞれ示す。

また、補強する機器の順番によって補強機器数に対する供給信頼性が大きく変化する。本研究では、Retrofit Cost の算定方法を統一するため、耐震補強の優先順位決定に以下の方法を用いた。

変電所 \$S\$ 内に設置した機器 \$i\$ に属する機器の損傷による系統全体での総供給支障電力期待値を、供給支障制約係数 (\$CSPC_{Si}\$) として式(10)に定義する。耐震補強は、式(10)で定義する供給制約係数 (\$CSPC\$: Coefficient of Supply Power Constraint) を評価関数として、その値の大きい順に行うものとした：

$$CSPC_{Si} = \sum_{d=1}^{nSd} E(DP_{Sd}^i) + \sum_{l=1}^{nSl} E(OL_{Sl}^i) \quad (10)$$

ここで、\$E(DP_{Sd}^i)\$ は、変電所 \$S\$ 内の負荷ノード \$d\$ への供給支障電力期待値を示す。\$E(OL_{Sl}^i)\$ は、変電所 \$S\$ 内の機器 \$i\$ の被害により送電線 \$l\$ に生じる過負荷期待値を示す。\$nSd\$ は、変電所 \$S\$ の負荷ノード数、\$nSl\$ は、変電所 \$S\$ に接続する送電線数を示す。ただし、本研究では、同一変電所内のの変電機器をある程度グループ化してグループごとに補強の順位を決定することを想定している。この場合には、式(10)の \$i\$ は機器グループとなる。以下



○: 変電所

—: 送電線

注: 送電先の付近に位置する数字は、各送電線の定格容量(MVA)を示す。

図-3 北海道釧路地方に存在する実在 2 次系統の系統モデル

のケーススタディでは、同一変電所内のすべての同一機器を \$i\$ としてグループ化し、\$CSPC_{Si}\$ を計算した。

3. 釧路系統を用いたケーススタディ

(1) 北海道釧路地方の実 2 次系統のモデル化

図-3 は、北海道電力釧路支店の実在 2 次系統をモデル化して示している。変電所をノードに、送電線をリンクにモデル化して、総ノード数 56 個、総リンク数 59 個のメインネットワークとした。同系統の供給源となる一次変電所は、ノード 1 と 2 に相当する。また、系統の需要電力は、1994 年 10 月 19 日の需要電力がピークとなったときの値を使用し、総需要電力は、約 661MVA (MVA ≒ MW) である。また、送電線の定格容量は図-3 の各リンクの横に示した。

図中のそれぞれのノードは、さらに、変圧器、母線、遮断器、断路器をノードとし、機器間のリード線をリンクとしたサブネットワークを構築している。全サブネットワークの総ノード数は 864 個である。

(2) 想定条件

想定地震は、1993 年釧路沖地震とし、以下の 2 ケースの地震被害および耐震補強法を想定した。

ケース 1

想定事故: 地震動により発生する断路器碍管 (insulating tube) 部の歪が許容歪を上回り、破損に至る。

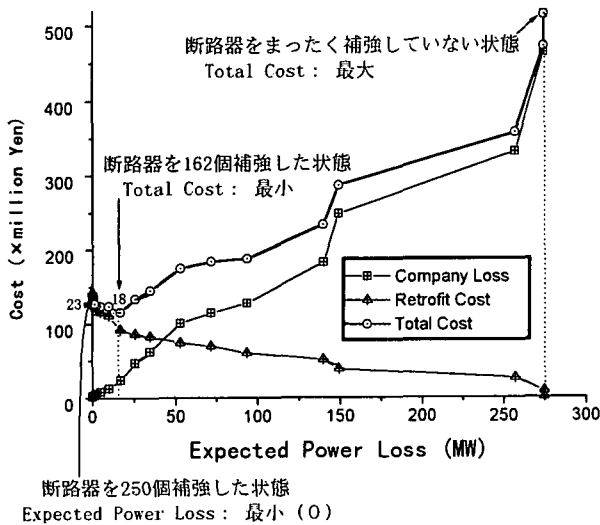


図-4 釧路系統の断路器 (474 個) を対象とした費用便益分析

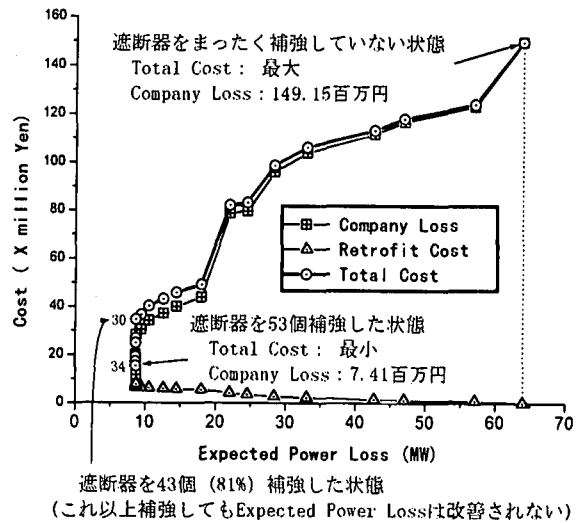


図-5 釧路系統の遮断器 (53 個) を対象とした費用便益分析

耐震補強法：剛性の高い架台 (trestle) に取り替え
補強対象断路器数：474 個

ケース 2

想定事故：地震動により発生する遮断器架台腹材 (web member) 応力が許容応力を上回り、架台が破壊に至る。

耐震補強：補強材の追加により架台の剛性を強化し、腹材に作用する応力を低減させる。

補強対象遮断器数：53 個

(3) 断路器の耐震補強に関する検討

図-4 は、釧路系統の 474 個の断路器を対象とした費用便益分析を行った結果を示す。図-4 は、a) 全補強対象機器数 (474 個) に対して、34.2% (162 個) の機器を補強した状態で、Retrofit Cost と Company Loss の総和が最小となる状態となること、2) 全補強対象断路器数の 52.4% (250 個) にあたる断路器を耐震補強すれば、供給支障電力期待値を 0 とすることができることを示している。

(4) 遮断器を対象とする補強対策実施例の検証

図-5 は、釧路系統の 53 個の油遮断器を対象として実際に行われた耐震補強を提案したモデルに基づき、費用便益分析した結果を示す。図-5 は、a) 実施された補強により、全く補強しない状態に対して Company Loss を 5.0% (=7.41/149.15 百万円) にまで抑えることができること、b) 逆に、全補強対象断路器数に対して約 81% (43 個) の補強で系統の供給支障電力期待値は最小となることを示している。

4. まとめ

本研究では、地震時の変電設備を対象として、費用便

益の観点から実務者の意志決定を支援するコスト評価モデルを構築し、実践的な耐震補強計画の検討例を示した。具体的には、3つの解析ステップから構成される費用便益分析手法を開発し、地震時における送電系統の供給支障電力期待値、耐震補強コストおよび企業損失コストとの関係を定量的に分析することを可能とした。その手法を北海道釧路地方に存在する実在 2 次系統に適用し、釧路沖地震を想定して、断路器および遮断器を対象とする耐震補強計画について検討した。その結果、補強の対象となるすべての機器を補強しなくても合理的に供給信頼性を向上する計画が立案できることが明らかとなった。

謝辞：本論文は、(財) 電力中央研究所と米国地震工学研究センター (NCEER) の共同研究の成果を、取りまとめたものである。また、北海道電力の方々には、多大な協力を得た。関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 電気技術基準調査委員会：変電所等における電気設備の耐震対策指針, JEAG 5003, 社団法人 日本電気協会, 1980.10.
- 2) 朱牟田善治, 竹中清, 桃井直美, 石田勝彦：地震時における電力基幹系統の信頼性評価法, 土木学会論文集 No.507/I-30, pp.243-253, 1995.1.
- 4) 朱牟田善治, 桃井直美, 石田勝彦：地震時における電力 2 次系統の信頼性評価法, 土木学会論文集, No.549/I-37, pp.249-260, 1996.10.
- 5) Applied Technology Council: Seismic vulnerability and impact of disruption of lifelines in the conterminous united states, ATC25, Federal Emergency Management Agency, 1991.