

# リファレンスネットワークに基づく 配電系統信頼性評価について

川原耕治\*

## Reliability Assessment of Distribution Networks Based on Reference Network Concepts

Koji KAWAHARA\*

### ABSTRACT

Distribution systems are inherent monopolies and therefore these have generally been regulated in order to protect customers and to ensure cost-effective operation. In the UK this is one of the functions of OFGEM (Office of Gas and Electricity Markets). Initially the regulation was based on the value of assets but there is a trend nowadays towards performance-based regulation. In order to achieve this, a methodology is needed that enables the reliability performance associated with alternative investment strategies to be compared with the investment cost of these strategies. At present there is no accepted approach for such assessments. Building on the concept of reference networks proposed in [1, 2] this paper describes how these networks can be used to assess the impact that performance driven investment strategies will have on the improvement in reliability indices. The method has been tested using the underground and overhead part of a real system.

キーワード：リファレンスネットワーク，信頼性指標，配電系統，投資シナリオ

Keywords: Reference network, Reliability index, Distribution network, Investment scenario

### 1. まえがき

1990年に始まったイギリスでの電力自由化は1999年に送電部門（NGCによる1社独占）を除いた発電・配電・供給の3部門は完全自由化されている。電力・ガス市場規制庁（以後OFGEMと呼ぶ）は、需要家保護の立場から市場に対する参入企業に様々な規制を課している。例えば配電会社は二重投資を避けるために地域独占が許される代わりに、料金規制（プライスカップ）と電力品質の最低保障制度が適用されている。前者の料金規制は物価指数に連動して電気料金の上限を決めるもので、配電会社のコスト削減を促し電気料金低廉化の一助となった。一方、後者の保障制度は定められた品質を逸脱すると需要家に対して個別に金銭保障を行うものであるが、直接品質向上の為の施策にはつながらなかった。これは自然条件の異なる地域に存在す

る配電会社の品質評価方法の困難さと品質改善のためのインセンティブがなかった事が原因と考えられている。

そこでOFGEMは、電力品質向上のための投資を配電会社に促すためIIP（Information and Incentive Project）を開始した。その目標は品質に関して評価を行い悪ければペナルティ、良ければ報償を与えるものである。品質は電圧階級に応じた停電回数（CI）、停電時間（CML）および電話による苦情応答の3つが提案されている。これらの指標はインセンティブの算出根拠であることから各会社のパフォーマンスを正しく評価し、地域間の影響を考慮した上で比較可能なものでなければならぬ。しかしながら、提案された指標の算出は年間の統計データを利用するため、系統構成が考慮されておらず各配電会社が目標とするパフォーマンス設定に複雑な調整を必要とする。加えて、たとえ正しく評価された

\*電子・電気工学科

としても、どのような投資を行えば品質改善が達成できるのかという、配電会社にとって真に必要な情報を得ることはできない。

このような状況を踏まえ、UMIST (University of Manchester Institute of Science and Technology) では、事情の異なる配電会社の信頼性を正しく評価し、パフォーマンスの悪い配電システムに対する投資戦略を与えるツールの開発を行っている。それは膨大な数の配電線回路をクラスタリング手法によって代表システムに分類し、得られたシステムに対して開閉器や遮断器の動作を含めた故障シミュレーションから信頼性指標を計算する。本稿では、信頼性評価の基本概念であるリファレンスネットワークについて説明し、クラスタリングパラメータの選び方について述べる。加えて、代表システムの信頼性指標からそれらを構成する個々の配電回路を特定する手法について提案し、実際の配電システムに適用した結果、有効性が確認されたのでこれについても報告する。

## 2. リファレンスネットワークコンセプト

配電システムは二次変電所から需要家まで電力を送るための回路で、供給信頼度を確保するためメッシュ状の構成となっている。しかしながら運用上は保護が困難になる理由で開閉器の一種であるNOP (Normally Open Point) を開くことで放射状システムとして運用する。これにより、配電システムは変電所を電力供給点とした放射状給電線の集まりと見なす事ができる。リファレンスネットワークのポイントは、個々の放射状給電線の信頼性を評価するのではなく、給電線回路を構成する線路長や需要家数などをパラメータとしてクラスタリングを行って得られた代表システム (Representative Network) を利用することにある。図1にリファレンスネットワークの概念図を示す。初めに顧客数、回路長、NOPなど

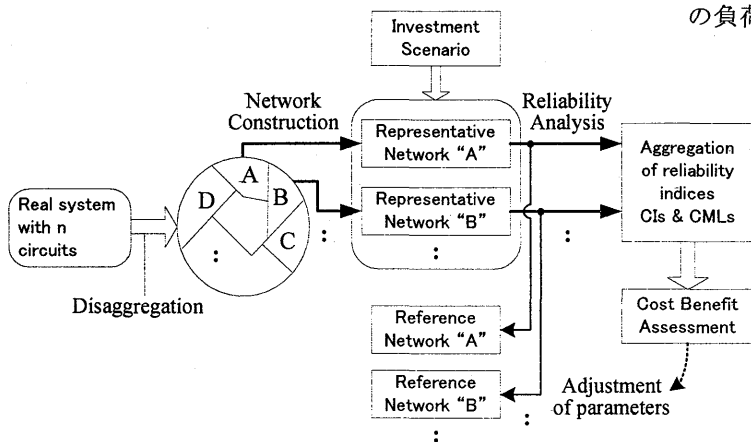


図1 リファレンスネットワークコンセプト  
Fig.1 Reference network concept.

の給電線の特徴付けるパラメータを用いてクラスタリングを行い代表システムを得る。得られた代表システムから故障率と停電時間の負荷点信頼性指標であるCIとCMLを計算し、個々の結果を集めることで会社全体のパフォーマンスを測る。また、クラスタリングに用いるパラメータを費用効果分析に基づいて決定したものがリファレンスネットワークとして定義される。

## 3. クラスタリング

この章では、適切な代表システムを実現するために必要なパラメータとクラスタリングからどのように代表システムを得るかについて述べる。

### 3.1 代表システムの構築

代表システムを作るには様々な方法が考えられるが、主に配電システムの構成と配電会社が把握して利用可能な実データがどれだけ得られるかに依存すると思われる。これまで我々が実施しているプロジェクトに参加している配電会社を通じて得た9種類のデータを以下に示す。

- (1) ネットワークの種別：ケーブル，架空線，その混合
- (2) 主線路に対する分岐線の割合
- (3) NOPの数
- (4) 回路長と平均分岐間隔
- (5) 負荷点の数
- (6) 需要家数
- (7) 各線の故障率と停電時間
- (8) 遮断器の数と配置
- (9) 開閉器の数と配置

上記のデータからわかるように、利用できるデータに回路の接続情報は含まれていないので、代表システムを構築するために何らかの規則が必要になる。そこで本稿では、クラスタリングを構成する実データの需要家数に関する加重平均をとり、開閉器は等間隔で配置するものとする。図3は架空線で2つの分岐線、30箇所の負荷点を有する場合の代表システムの構成例である。

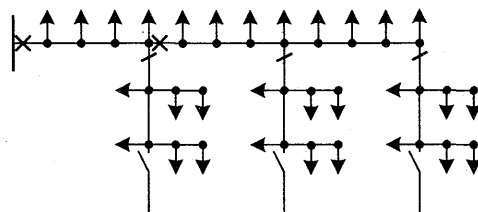


図2 代表システムの構成例

Fig.2 An example of a representative network.

### 3.2 評価手法

代表系統は前述の9つのパラメータの選択とパラメータの持つ境界値を変えることで無数に作り出すことができる。その中で所望の代表系統を得るには何らかの評価法が必要となる。図4に提案する評価法の概要を示す。図において、クラスタリングで得た代表系統Aはn個の実回路の加重平均によって作られた回路であり、2つの信頼度指標値がそれぞれCI\_AとCML\_Aである。一方、n個の実回路それぞれについても信頼度指標を計算することができるので、次式で定義される加重平均をとればクラスタAの信頼度指標を得ることができる。

$$CI_{clusterA} = \left( \sum_{i=1}^n CI_{-i} \times Cust_i \right) / \sum_{i=1}^n Cust_i \quad \dots (1)$$

ここで、CI\_iはクラスタAにおける回路iの信頼度指標である。また、CMLについても同様に計算可能である。従って、代表系統Aに関してn個の実回路から得た信頼度指標を真値として相対誤差を算出する。

$$(CI_{-A} - CI_{clusterA}) / CI_{clusterA} \times 100 [\%] \quad \dots (2)$$

この相対誤差が小さくなるようなクラスタリングパラメータを選ぶものとする。

様々なパラメータを試みた結果、相対誤差を小さくする重要なパラメータはNOP，主線路上の遮断器(FBD)の数、回路の種別であった。

### 4. 投資シナリオの考慮

信頼度向上を目的とした配電会社の投資行動は、長期と短期の戦略に分けることができる。例えば、今後10年間に20%の給電線を交換を計画し、次にその実現のためどの回路にするか特定作業を行う。代表系統は、長期の意思決定において個々の回路の信頼度指標を検討しなくても投資のための代替案を提供することができる。次節では短期戦略の意思決定に対しても代表系統を活用できるように、寄与率と代表系統の信頼度指標から個々の回路を特定するための予測手法について説明する。

### 4.1 寄与率

投資シナリオを個々の回路に適用するとき、それらの信頼度指標がどのように代表系統の信頼度に影響するか検討するため、次式で与えられる寄与率を計算する。

$$Cont\_CI_i^k = \frac{\Delta CI_i^k \times Cust_i^k}{\Delta CI_{rep}^k \times \sum_{j=1}^{N_k} Cust_j^k} \quad \dots (3)$$

ここで、 $\Delta CI_{REP}^k$ と $\Delta CI_i^k$ はクラスタkにおける代表系統の信頼度指標の変化とクラスタkに属する回路iの信頼度指標の変化をそれぞれ表している。 $Cust_i^k$ と $N_k$ はクラスタkに属する回路iの需要家数と回路数をそれぞれ示している。図5は投資シナリオをN個の回路からなるクラスタに適用し、その数を変えながら寄与率の変化(信頼度指標の改善)を示したものである。代表系統の寄与率の変化は適用する回路数によらず図に示すように常に一定になる。これは代表系統がそれを構成する実回路の平均で作られた為である。しかしながら、実際の回路ではその構成が異なるため、寄与率も一定ではない。図5は寄与率の大きい順に実回路を並べ替えて描いてある。想定された投資シナリオがクラスタを構成する全ての回路に適用されるなら、代表系統の信頼度指標により投資効果を見極めることができるが、実際にはそのようなケースは稀である。

### 4.2 寄与率の予測

代表系統の信頼度指標から、個々の実回路の投資シナリオの変化に対する振舞いを得るためには、出来るだけ少数の実回路から成る代表系統を多数作ることが考えられる。しかしながら、これは少数の代表系統で信頼度評価を行うというリファレンスネットワークのコンセプトから逸脱する。そこで本稿では、図5に示した直線に変化する代表系統の寄与率から、曲線的に変化する実回路の寄与率を予測することを試みる。その手掛かりとして回路種別がケーブルでFBDを主線路上に持たない25の実回路で構成されるクラスタを考える。このクラスタに、FBDを追加する投資シナリオを適用し、各回路の寄与率を計算したものを図示したものが

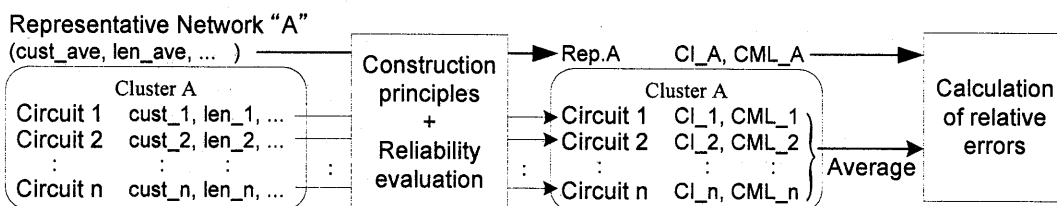


図3 代表系統の構成例

Fig.3 Outline of the evaluation method of representative networks.

図6である。この図において、横軸は需要家数、縦軸は回路の総延長距離を表し、図上の円の大きさが寄与率を与えている。また、この図に示された放物線は、代表系統の需要家数×回路長を基準に描いたもので、代表系統の寄与率を表すハッチの入った円を通過する放物線が1となる。この放物線と寄与率との間に強い相関があることが分かるので、実回路の需要家数と回路長を使った寄与率の予測式を提案する。

$$\overline{Cont\_CI_i^k} = Cont\_CI_{REP}^k \times \frac{Length_i^k \times Cust_i^k}{Length_{REP}^k \times Cust_{REP}^k} \quad (4)$$

ここで、 $Cont\_CI_{REP}^k$  はクラスターkにおける代表系統の寄与率、 $Length_i^k$  と  $Length_{REP}^k$  は代表系統と実回路iのそれぞれ実回路長である。同様に、 $Cust_i^k$  と  $Cust_{REP}^k$  は代表系統とそれぞれの実回路iとの需要家数である。図5に示した例について(4)式の予測手法を適用した結果を図6に示す。同図の直線はFBDの追加という投資シナリオを適応した場合の代表系統による信頼度指標の改善を示している。この代表系統の変化を使って実回路の寄与率を予測した結果と、実際の実回路の結果が▲印と□印でそれぞれ図示されている。この例では提案した予測手法が実回路の寄与率にほぼ完全に追従していることが分かる。

### 5. 適用例

提案手法の有効性を確認するため、ケーブル(都市部における埋設線:UG)と架空線(郊外:OH)の2つに分類される実データに適用した。表1にそれぞれのデータの概要を示す。各データはNOPの数によって分岐線などの構成が異なる3つに分けられる。

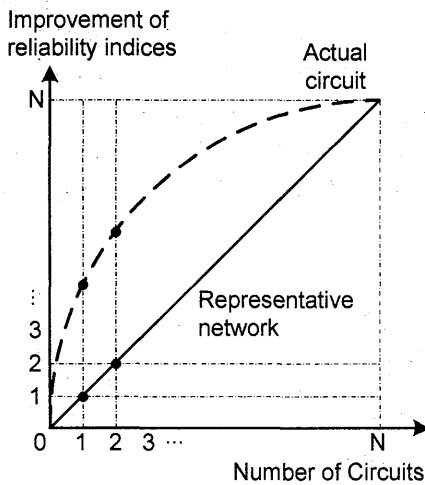


図4 寄与率の影響

Fig.4 Influence of contribution ratios.

### 5.1 クラスタリングパラメータの検証

クラスタリングパラメータとしてNOPとFBDを適用し、その結果を表2と表3に示す。これらの表は代表系統から得られる信頼度指標と、実回路から得られる信頼度指標の平均値との間で相対誤差を計算した結果である。表の左から4行目までは各クラスターにおける系統構成を示している。2つのクラスタリングパラメータ、即ちNOPによるブランチングレベルが3種類とFBDの有無によって最大6個の代表系統が得る可能性があるが、UG系統と3個、OH系統で5個となった。表2よりUG系統では各クラスターの相対誤差は非常に小さくなっているが、OH系統ではCMLの相対誤差が大

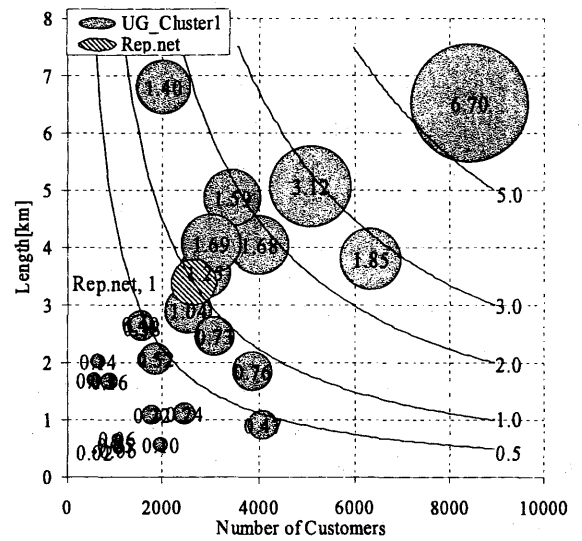


図5 寄与率と需要家数×回路長の関係

Fig.5 Relationships between the contribution ratios and the product of length and number of customers.

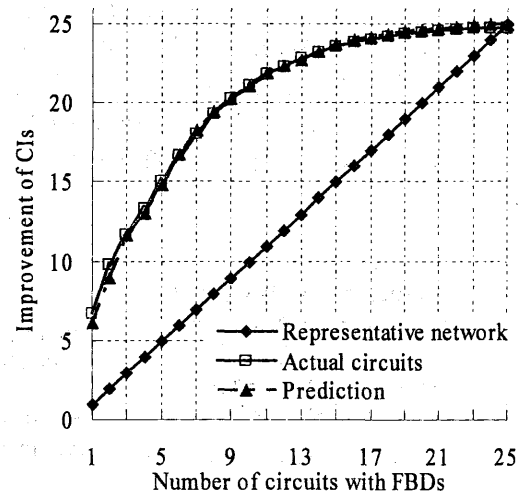


図6 予測手法の例

Fig.6 An example of prediction method.

きくなる傾向にある。これは、UG系統が分岐があまりないシンプルな構造であるのに対して、OH系統が分岐およびサブ分岐まで有する複雑な構成となることに起因していると考えられる。結果としてUG系統は選択した2つのパラメータで十分であるが、OH系統については更なるパラメータが必要であり、現在検討中である。

## 5.2 投資シナリオの適用

提案する予測手法の有効性を確認するため、前節のUGとOH系統に対してそれぞれ2つずつの投資シナリオを適用する。まず、表2に示すUG系統に対して適用する投資シナリオは次の通りである。

- ・シナリオ1：NOPを持たないクラスタ1に対して、25%のNOPを新設する。
- ・シナリオ2：クラスタ3に属する646回路のうち、15%に対して故障率を0.035[f/km]に減らす。（配電線の張替えを意味する）

これらのシナリオを適用した結果を図7に示す。図中の3本の線は代表系統、実回路、予測手法のそれぞれ

について描いたもので、縦軸は適用されたシナリオに対する指標の改善を示しており、横軸は適用する回路数を表している。図7(a)のシナリオ1の適用例では、クラスタ内52回路中、約13回路に対してシナリオを適用することになるが、代表系統から得られる指標改善値は13であることがわかる。一方、実回路から得られた結果では約40の改善値が期待できることが図より読み取れ、回路の選び方によって3倍程度の差が出ることを意味する。提案した予測手法は実回路の振舞いを上手く捉えており、その有効性が確認できる。

シナリオ2については図7(b)に示す結果を得た。代表系統による改善値の変化は直線でシナリオ1の例と変わらないが、この例では実回路と予測手法による振舞いに明らかな差が見て取れる。このシナリオに対して代表系統、実回路、予測手法の改善値はそれぞれ97, 371, 267となった。予測手法は明らかに代表系統のそれよりも優れてはいるが、シナリオ1のように精度は高くない。これは適用したクラスタがブランチンレ

表1 入力データの特徴  
Table1 Characteristics of input data.

	UG system			OH system		
	I	II	III	I	II	III
Number of circuits	1056			182		
Branching levels (Categories)	3			3		
NOPs	0	1 (on the main feeder)	1 (on the main feeder)	0	1 (on the main feeder)	Every lateral feeders
Number of laterals	0	0	1~26	3~77	1~48	2~15
Number of sub laterals	0			0	0	3~140
Incoming breakers	One at the beginning of the main feeder			One at the beginning of the main feeder		
Circuit length[km]	0.02~37.7			0.7~121.5		
Number of customers	1~8986			16~1561		
Failure rates	0.035~0.07			0.14~0.17		
Others	Both sides of branches have switching devices					

表2 UG系統におけるクラスタリングと評価結果

Table2 Clustering and evaluation results by parameters NOPs and FBDs in UG

	Branching categories	Number of FBDs on the main feeder	Number of circuits	Representative networks		Average of actual circuits		Relative errors [%]	
				CIs	CMLs	CIs	CMLs	CIs	CMLs
Cluster1	I	0	52	93.5	358.3	93.5	347.5	0.00	3.12
Cluster2	II	0	358	27.8	11.9	27.8	11.9	-0.04	0.02
Cluster3	III	0	646	51.5	23.4	51.5	23.7	0.00	-1.10
Total			1056	50.8	43.1	50.8	42.7	0.00	1.15

表3 OH系統におけるクラスタリングと評価結果

Table3 Clustering and evaluation results by parameters NOPs and FBDs in OH system.

	Branching categories	Number of FBDs on the main feeder	Number of circuits	Representative networks		Average of actual circuits		Relative errors [%]	
				CIs	CMLs	CIs	CMLs	CIs	CMLs
Cluster1	I	0	4	82.4	405.8	81.6	405.3	1.00	0.13
Cluster2	II	0	10	427.7	373.3	422.4	369.9	1.27	0.93
Cluster3	II	1~2	7	295.2	343.7	312.6	426.4	-5.57	-19.38
Cluster4	III	0	154	480.8	413.9	465.1	400.8	3.37	3.26
Cluster5	III	1~3	7	398.0	466.6	394.0	421.0	1.02	10.83
Total			182	470.9	413.7	456.8	401.7	3.08	2.99

ベルがⅢと高く、クラスタを構成する回路数も約600と多いことが原因と思われる。ブランチングレベルが高いクラスタは回路数を多くしない工夫が必要である。次にOH系統についても下記のようなシナリオを用意した。

- ・シナリオ3：154回路で構成されるクラスタ4のうち、18%の分岐線にFBDを新設する。
- ・シナリオ4：クラスタ3のうち30%の故障率を0.12[f/km]に減じる。

図8にそれぞれのシナリオを適用した結果を示す。図7と同様に、指標改善値が3種類の方法によって描画される。シナリオ3は、予測手法と実回路の振舞いが適用回路数が少ないところで大きな差は無いが、その差は徐々に広がっている。最終的に表3で示した相対

誤差だけずれることになることから、その差を小さくするクラスタリングパラメータ選びの重要性がわかる。

一方、シナリオ4は回路数が7と少ないクラスタへ適用されていることも一因で、予測手法と実回路の振舞いがやや似ている。OH系統はUG系統に比べ複雑な構成となるが、クラスタを構成する回路数を小さくすると、予測手法が有効になるケースがあることを示している。

## 6. おわりに

本研究はイギリスにおける電力完全自由化後、設備更新に関する投資の失敗から需要家サイドの供給信頼性悪化に端を発した状況を打破すべく始まった研究で

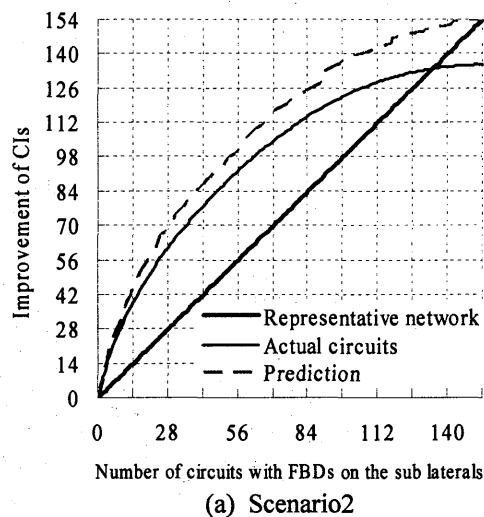
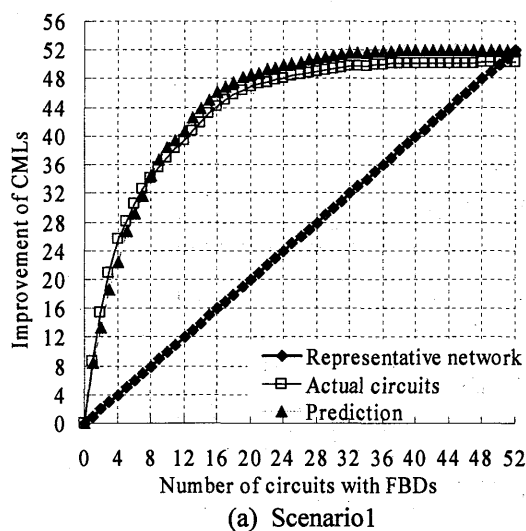


図7 シナリオ1, 2のUG系統への適用例

Fig.7 An example of application of scenarios to UG system.

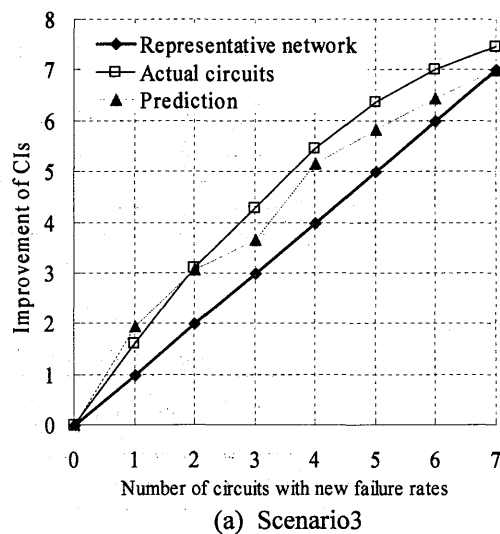
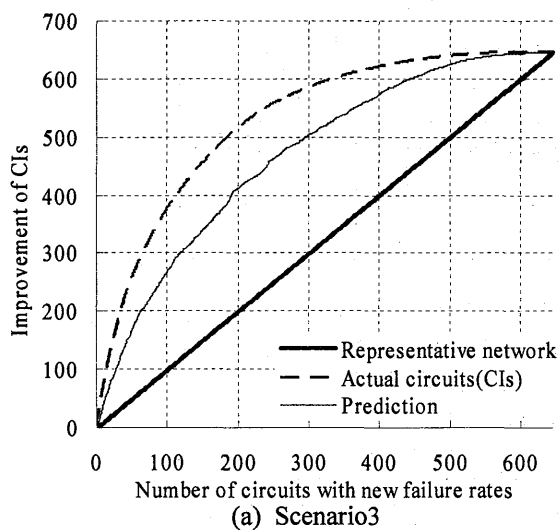


図8 シナリオ3, 4のOH系統への適用例

Fig.8 An example of application of scenarios to OH system.

ある。リファレンスネットワークの概念を用いれば、配電会社自身の供給信頼度を評価するのみならず、設備投資に対してその効果をシミュレーションできる画期的なツールである。現在もこの研究は3つの配電会社と1つのコンサルタント会社が参加するプロジェクトとして遂行中である。本稿では、これまでの成果として寄与率を定義しそれを各回路の需要家数と回路長を利用した予測手法によってリファレンスネットワークの有効性を示した。今後は、更なるクラスタリングパラメータと、信頼性評価の為にシステムモデルについて研究を進めていく予定である。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり有益な助言を頂いた United Utility の V.Levi 博士、並びにマンチェスター工科大学 (UMIST) の G.Strbac 教授、R.Allan 名誉教授に大変お世話になったことに深く感謝します。

#### 参考文献

- [1] G.Strbac and R.N.Allan: Performance regulation of distribution systems using reference networks, *Power Engineering Journal*, December 2001, pp. 295-303.
- [2] V Levi, G.Strbac and R.N.Allan: Concept of reference networks, to appear in the *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, 2004.
- [3] R.Billinton and R.N.Allan: *Reliability evaluation of power systems*, Plenum Publishing, New York, 2nd Edition, 1996.
- [4] OFGEM: Information and Incentives Project: Incentive schemes - Final proposal, December 2001, <http://www.ofgem.gov.uk>.
- [5] OFGEM: Information and Incentives Project: Comparing quality of supply performance, October 2002, <http://www.ofgem.gov.uk>.