運用を考慮した基幹系統の供給信頼度解析システムの開発

正員 栗原 郁夫* 正員 竹原 有紗*
 正員 中地 芳紀** 正員 加藤 安紀**
 正員 岩渕 直幸***

Development of Power System Reliability Analysis Program in Consideration of System Operation

Ikuo Kurihara*, Member, Arisa Takehara*, Member, Yoshiki Nakachi**, Member,
 Yasunori Kato**, Member, Naoyuki Iwabuchi***, Member

This paper describes a new program which analyzes reliability of composite power systems taking power system operational aspects into consideration. It uses sequential Monte Carlo method and calculates annual risk indices for each load point. The program deals with the system problems involved in load flow, voltage, frequency and small signal stability if necessary. The feature of the program is consideration of power system operation in chronological manner such as generation dispatch and system restoration after equipment faults. This allows the evaluation of both power system planning and operation from reliability point of view. Several new methods to reduce calculation time are developed and implemented including the concurrent LP/load flow method which improves the solvability.

キーワード：供給信頼度，基幹系統，系統運用，モンテカルロ法，加重サンプリング，LP 一体型潮流計算

Keywords: power system reliability, composite system, power system operation, Monte Carlo method, important sampling, concurrent LP/load flow

1. はじめに

電力自由化が進展する中で、信頼度とコストの調和を図ることがこれまで以上に重要になってきている。供給信頼度を定量的に評価し、設備対策や系統運用ルールがコストと信頼度に与える影響を明らかにすることは、そのための一つの有効なアプローチである。

確率論的手法に基づく供給信頼度の定量的評価については主として欧米を中心に以前から研究が進められてきた^{(1)~(3)}。わが国では、近年になっていくつかの研究が報告されているが^{(4)~(7)}、諸外国に比べてその数は少ない。供給信頼度

の定量的評価を行うには、そのための解析ツールが必要となる。信頼度解析は解析対象、解析手法の違い、適用目的等によっていくつかに分類されるが、電力自由化の下での電力取引の増大、混雑発生、設備投資の削減などを考慮すると、基幹系統を対象とした解析が重要となる⁽⁸⁾。また、今後、既存設備の有効活用の観点から系統運用の重要性が一層高まることを念頭に置くと、解析に当たっては系統運用面が考慮できることも重要となる。

以上の背景から、著者らはこれらを考慮できる時系列モンテカルロ法を適用した基幹系統の供給信頼度解析システムの開発を進めてきた^{(9)~(11)}。本論文では、開発したシステムの概要とともに、解析の効率化手法や、適用性向上のためのモデル化方法などについて述べる。すなわち、まず第2章で今回開発した信頼度解析システムの位置づけと全体像を示し、次いで第3章で、主要部分のモデル化方法を述べる。第4章では解析効率化のための計算時間短縮化方策と求解性向上策について述べ、第5章ではモデル系統に対する計算例を示す。

2. 時系列モンテカルロ法による信頼度解析

2.1 開発システムの位置付け 電力系統の供給信

* (財)電力中央研究所
 〒201-0081 狛江市岩戸北 2-11-1
 Central Research Institute of Electric Power Industry.,
 2-11-1, Iwato-kita, Komae 201-8511

** 中部電力(株)技術開発本部
 〒459-8522 名古屋市緑区大高町字北関山 20-1
 Chubu Electric Power Co.Ltd.
 20-1, Sekiyama, Ootaka, Midori-ku, Nagoya 459-8522

*** (株)電力計算センター
 〒157-0067 東京都世田谷区喜多見 9-4-2 みのわビル 2F
 Denryoku Computing Center, Ltd.
 9-4-2, Kitami, Setagaya-ku, Tokyo 157-0067

表 1 信頼度解析の分類と開発システムの位置付け

Table 1. Classification of power system reliability analysis.

system to be analyzed		aspect of reliability	analytical method	
generation		adequacy	state enumeration	
network	trunk transmission network			
	sub-transmission network	security	Monte Carlo method	non-sequential
	distribution network			
generation + transmission (composite system)				sequential

信頼度の解析については解析対象や手法から一般に表 1 のように整理される。今回開発したシステムは、表 1 の分類の網掛け部分に相当し、解析対象としては基幹システムについて、電源と送電システムを一体的 (composite system) に扱い解析を行うものである。また、信頼度については、一般に、事故を考慮したシステムの定常的な供給能力を問題とするアデカシーと、事故の波及防止能力を問題とするセキュリティに分けて考えられるが、本システムは静的な供給信頼度に相当するアデカシーを対象とする。さらに、解析手法としては、負荷の変動や系統復旧操作など、時間の流れを考慮できる時系列モンテカルロ法を用いる。

2.2 信頼度解析フロー 開発した時系列モンテカルロ法による信頼度解析の流れを図 1 に示す。時系列モンテカルロ法では、時間に沿って事故発生を含む系統状況をシミュレーションしていく。本システムでの時間ステップは基本的には 1 時間で、年間の平均値としての信頼度指標を算定する場合は 8760 時間を一つの単位として繰り返す。

信頼度解析では通常の潮流計算に比べて、より詳細な系統データが必要である。特に重要となるのが母線構成であり、遮断器や断路器の設置状態などをモデル化し、事故時に停止する範囲や系統切り替え操作を表現している。

シミュレーションに当たっては、まず、平常時の系統状態を設定する。次いで、個々の設備ごとに故障率に応じた、健全ないし故障状態のサンプリングを行う。この結果、何らかの設備故障が発生した場合は、それによって系統異常が生じるかどうかを評価する。系統異常としては設備過負荷、電圧異常、周波数異常、電圧安定性 (静的) を基本とし、必要に応じて定常安定度を考慮する。

系統異常が生じる場合には、運用によって異常の解消が可能かどうかを試み、供給側の対応のみでは解消できない場合には、最も少ない量で系統異常を解消できるような負荷の削減箇所と量を決定する。この負荷削減量が信頼度指標の算出に用いられる。以上の計算を、所要の精度が得られるまで繰り返し、年間の平均値としての信頼度指標を算定する。

図 1 時系列モンテカルロ法による信頼度解析

Fig. 1. Flow chart of reliability analysis using sequential Monte Carlo method.

以下、主要なモデルについて具体的な扱いを述べる。

3. 信頼度解析モデルの概要

3.1 需給・系統運用のモデル化 本システムは計算効率化のために、平常時の系統状態については年間分を事前に算定する方法を採用しており、最初に以下を決定する。

(1) 定期補修 電源については、ユニットごとに補修実績を入力するか、または自動で割り当てる。自動による補修計画立案方法は、供給予備力が年間を通じて出来るだけ均一になるように、対象電源を、容量が大きく補修期間の長い順に割り当てていく簡易法を採用している。また、送電線については、実績を入力する。

(2) 電源運用 電源運用については、水力発電とその他で大別される。水力については実績値等を入力する。原子力と火力については、ベース運転指定電源は定格出力、ミドル、ピーク指定電源は、それぞれの中で優先順位に従って起動を決定し、経済負荷配分を行う。なお、水力については予備力表現として別途、月別の出力上限 (定格出力比率) を与える。

(3) 系統運用 系統状態は最適潮流計算によって設定する。すなわち、各時間帯ごとに系統制約を満足しつつ、燃料費が最小となる運用状態を決定する。

3.2 確率事象のモデル化 本システムで確率事象

として扱うのは系統構成機器の故障ならびにその修理である。ここで故障は、事故と表現されることもあるが、雷事故での再閉路成功のような過渡的事象ではなく、問題となる設備を系統から切り離して修理などの何らかの処置を必要とするような事故である。故障発生設備としては、発電機、送電線、変圧器、母線、遮断器、断路器、調相設備を考える。CT や PT など、その他の機器の故障が影響する場合には関係する設備の故障と一体化して扱う。また、故障率 λ については一定とする。

設備の修理については、修理時間の分布が一般に、対数正規分布に従うことが多いという結果⁽¹²⁾と、分散が小さい場合にはこれが正規分布に近くなることに基づき、修理率 $\mu(t)$ を (1) 式で表現している。

$$\mu(t) = \frac{f(t)}{1 - \int_0^t f(t)dt} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $f(t)$ は正規分布で、修理時間の平均値とその標準偏差を与える。

故障、修理は、擬似乱数を用いて指定した故障率、修理率となるように発生させる。擬似乱数には周期性、生成の高速さで優れている Mersenne Twister 法⁽¹³⁾を用いる。

遮断器や断路器のように同じ故障率と考える数多くの設備に対する故障の設定については、以下のような二段割り当て法を用いる。すなわち、 n : 設備数、 λ : 故障率、 ΔT : 計算ステップ幅とすると、 j 個の設備が故障している確率は $p = \lambda \Delta T$ として、

$$P_j = {}_nC_j p^j (1-p)^{n-j} \dots\dots\dots (2)$$

であることから、まず、この確率分布に応じたサンプリングで故障設備数 m を決定し、ついで m 回の 1 から n までのサンプリングを行い、故障を割り当てる。個々の設備毎にサンプリングする場合に比べた回数の比率は、平均故障数が $n\lambda$ であることから、

$$\frac{1+n\lambda}{n} \cong \lambda \dots\dots\dots (3)$$

λ は通常小さいため、効率的になる。

3・3 供給支障量の算定 本プログラムで扱う系統異常現象の範囲は静的な現象に分類される設備過負荷、電圧異常、周波数異常、電圧安定性(静的)、定態安定度である。このうち、定態安定度については外部プログラムとファイル交換を伴う。

系統状態の解析は通常の交流法の潮流計算による。ただし、電圧安定性問題などで解が求まらない場合に対しては第 4 章で述べる対策を行っている。

供給支障量の算定は、信頼度解析の中心となる部分である。本システムでは、供給支障量は、「系統異常を解消するために必要となる最小の負荷削減量」としている。もちろん、供給支障量は発電調整や系統切り替えなど、供給側の最大限の対策を行っても異常が解消されない場合に必要となる負荷削減量である。

供給支障量の算定には逐次線形計画法 (SLP) を用いる。すなわち、設備故障後の状態で線形化を行って以下のような LP 問題と、チェックのための潮流計算を繰り返す行う。

目的関数 :

負荷削減量 (重要度考慮) + 補助関数 $\rightarrow$ 最小化

制約式 (線形化) :

電力方程式

需給バランス、発電機出力制約、負荷量制約、設備過負荷制約、変圧器タップ制約、電圧制約、調相容量制約、定態安定度制約など。

ここで、上記の補助関数は発電コストの最小化や、変圧器タップ等の初期値からの大幅な変動を抑制するために必要に応じて設定する。

以下、供給支障量の算定における留意点を述べる。

(1) 周波数異常の扱い 通常の潮流計算と LP では周波数変動を許容しない負荷削減量が算出される。系統分離などの重大事故時の周波数変動の許容を概略的に表現する方法として、本システムではスラック電源の調整可能量に系統定数 K から決まる許容幅を設けることとしている。すなわち、スラック電源が定格出力を越えて運転される計算上の状態は、実際は許容範囲内の周波数変動のもとでの運転状態に対応する。

(2) 予備力の発動 本システムは前述の通り 1 時間を単位ステップとして計算を進めるが、事故直後の短時間過負荷を許容した系統操作などが考慮できるように、図 2 に示すように事故直後 10 分を別に扱っている。すなわち、この間においては、

- 瞬動予備力、運転予備力の発動可
 - 短時間過負荷許容のもとで系統切り替えを実施可
- としている。瞬動予備力、運転予備力については、起動中電源の運転余力のみでは不足する場合、揚水遮断、直流連系による緊急応援、水力発電の起動の順位で予備力が提供される。

待機電源の起動は、事故後 1 時間以降において、起動時間に応じて優先順位に基づいて行われる。その後、起動した電源も含めて経済負荷配分で出力を決定する。

なお、需給バランス上は問題ないが、系統制約が問題と

図 2 短時間過負荷許容時間のモデル化

Fig. 2. Modeling of short time overload allowance.

なり、待機電源を起動することでこれを解消できる場合もある。このため、本システムでは系統制約で供給支障が生じる場合においても、電源起動が一つのオプションとして考慮されている。

(3) 二次系統の負荷切り替え 基幹系統の供給信頼度を評価する場合に、二次系統の負荷切り替えまでを考慮するかは議論があるが、より実際に近い供給支障量を算定する意味からは、必要に応じて考慮できることが望ましい。二次系統は通常、放射状構成で運用されることから、最適な負荷切り替えは組み合わせ問題となるが、ここでは以下のように簡略的に扱っている。

本システムでは、二次系統の負荷は図 3(a) に示すように配電用変電所負荷を集約的に表現している。負荷切り替えでは以下の 2 通りを考慮している。

- 1 段切り替え：隣接変電所との負荷の持ち替え (b)
- 多段切り替え：連系グループ変電所すべての間での負荷の持ち替え (c)

これらの定式化は LP における負荷量の制約式を、
 グループ内の負荷の和 $\leq$ 初期負荷の値
 変電所負荷 $\leq$ 変電所容量上限
 とすることで実現できる。

(4) 定態安定度問題 定態安定度問題も静的な信頼

図 3 二次系統負荷切り替えのモデル化

Fig. 3. Load switching in sub-transmission network.

度評価の範疇に含めることができる。本システムにおいては、フラグ指定によって定態安定度問題を考慮した信頼度解析が可能である。

定態安定度問題の扱いについては、まず、明らかに対象外の事故は除外するものとして、固有値解析に基づく定態安定度解析を実施する。安定度が問題になる場合は、過負荷時と同様に最も効果的な発電調整、さらに、これのみでは困難な場合には負荷削減を行う。ここで、定態安定度の解析には不安定ないくつかの固有値だけを求める手法である S 法⁽¹⁴⁾を採用する。また必要となる発電調整、負荷削減量の算定には固有値感度を用いる。

固有値感度の計算は、事故後の動作点で線形化した状態方程式の係数行列 A が微小変化したときの固有値の変化 $\varepsilon\lambda$ を次式で求める。

$$\varepsilon\lambda = \mathbf{q}(\varepsilon A)\mathbf{p}/(\mathbf{p}\mathbf{q}) \dots\dots\dots(4)$$

ここで $\mathbf{p}$, $\mathbf{q}$ はそれぞれ右, 左固有ベクトルである。

具体的には、変化させるパラメータ α (発電調整, 負荷削減量) を指定し, εA を計算し, 不安定となる可能性をもつ固有値 λ_i の α_j に対する感度係数 K_{ij} を求める。

$$K_{ij} = \text{Re}(\partial\lambda_i/\partial\alpha_j) \dots\dots\dots(5)$$

最適な調整量については、LP の制約式に安定化のための以下の条件式を追加することで決定する。

$$\text{Re}(\lambda_{i0}) + K_{ij}\alpha_j \leq 0 \dots\dots\dots(6)$$

3.4 信頼度指標 算定される信頼度指標は基本的には以下の 4 つの年間のリスク指標である。これらは負荷地点毎の値と系統全体としての値の 2 つがある。

- ① 供給支障電力 (EPNS : Expected Power Not Supplied) : 供給支障電力 (kW) の年間期待値 [kW/年]
- ② 供給支障電力量 (EENS : Expected Energy Not Supplied) : 供給支障電力量 (kWh) の年間期待値 [kWh/年]
- ③ 供給支障時間 (EDNS : Expected Duration Not Supplied) : 供給支障の延べ時間の年間期待値 [h/年]
- ④ 供給支障頻度 (EFNS : Expected Frequency Not Supplied) : 供給支障の年間発生頻度 [/年]

ある設備の故障による供給支障は、時間的な需要の増減により計算上は離散的に生じることがある。このため、供給支障電力に関しては、各時間の値の和をとるか、平均をとるかという問題が、また頻度に関しては何を 1 回の供給支障とするかという問題が生じる。本システムではこれらを考慮するために、参考的に以下の指標を算定している。

- ⑤ AEPNS (Averaged EPNS) : ある設備故障によって生じる供給支障電力については平均化した場合の供給支障電力の年間期待値 [kW/年]
- ⑥ AEFNS (Averaged EFNS) : 同じ設備故障によって生じる供給支障は 1 回と数えた場合の供給支障頻度 [/年]

4. 計算時間の短縮化と求解性向上

モンテカルロ法の精度はサンプリング数に依存する。モンテカルロ法の誤差は通常、次の相対誤差指標 (RU) をもって評価される。

$$RU = \frac{\sqrt{V(F)}}{\sqrt{N}\tilde{E}(F)} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $V(F)$ は評価値 (供給支障電力量など) の分散、 $\tilde{E}(F)$ はその期待値 (求めたい結果)、 N はサンプリング数である。

このため、精度を向上するにはサンプリング数を増やすか、分散を減らすことが必要になる。

4・1 加重サンプリングによる高速化 モンテカルロ法における分散低減法については幾つかの手法が開発されている⁽¹⁵⁾。本システムでは時系列のモンテカルロ法を採用しており、これに適用可能な手法として加重サンプリングを適用する。

故障状態をサンプリングしても、実際には供給支障に至らないものが多く、この場合には供給支障の有無のチェックのための潮流計算と LP 計算の時間が結果的には無駄になる。実際に供給支障となるような事故を頻繁に発生させることができればモンテカルロ法の効率化につながる。加重サンプリングはそのための方法である。加重サンプリングについての理論的背景は付録に記すが、信頼度計算のための時系列モンテカルロ法への適用については以下のように行っている。

まず、扱いの容易さの観点から加重するのは、個々の設備の故障率とし、供給支障を引き起こしやすい設備 (例えば電源や変圧器) などとする。具体的にどの設備とするかは、供給支障の要因としての可能性を見極めるために、ある程度の試算が必要である。

今、規則正しく k 年に 1 回故障する設備があり (故障率: $1/k$)、その故障による年間の供給支障電力量が a で、復旧時間が m 年であるとする。この理想状態の繰り返しにおいて、通常のサンプリングによる供給支障電力量は、

$$\frac{ma}{k+m} \dots\dots\dots (8)$$

で与えられる。

ここで、この設備の故障率を β 倍することを考える。これは、 k/β 年に 1 回の割合で故障が生じることに相当するが、この場合にも (8) 式と同じ指標が得られなければならない。そのため、故障期間においては、時間単位を $1/\beta$ にし、供給支障量についても $1/\beta$ にするような操作を行うものとする。復旧時間は不変で m である。このとき、供給支障量の期待値は、

$$\frac{ma/\beta}{k/\beta+m/\beta} = \frac{ma}{k+m} \dots\dots\dots (9)$$

となり、加重する前の結果と同じになる。供給支障となる故障をより頻繁に起こすことになるため、同じサンプリン

表 2 加重サンプリングの実例

Table 2. Practical process of important sampling (example).

time sequence	state (0:failure)			coefficient				
	A weight: α	B weight: β	system	sampling number	power	energy	duration	frequency
1	1	1	1	1				
2	1	1	1	1				
3	1	0	1	$1/\beta$				
4	1	0	0	$1/\beta$	$1/\beta$	$1/\beta$	$1/\beta$	$1/\beta$
5	0	0	0	$1/\alpha\beta$	$1/\alpha\beta$	$1/\alpha\beta$	$1/\alpha\beta$	$1/\alpha\beta$
6	0	0	0	$1/\alpha\beta$	$1/\alpha\beta$	$1/\alpha\beta$	$1/\alpha\beta$	
7	0	1	1	$1/\alpha$				
8	1	1	1	1				
9	1	1	1	1				
10	1	0	0	$1/\beta$	$1/\beta$	$1/\beta$	$1/\beta$	$1/\beta$
11	1	0	0	$1/\beta$	$1/\beta$	$1/\beta$	$1/\beta$	
12	0	1	1	$1/\alpha$				
13	0	1	0	$1/\alpha$	$1/\alpha$	$1/\alpha$	$1/\alpha$	$1/\alpha$
14	0	1	0	$1/\alpha$	$1/\alpha$	$1/\alpha$	$1/\alpha$	
15	1	1	1	1				
16	1	1	1	1				
...	...	...	...	...	...	...	...	...

図 4 逐次線形計画法 (SLP) と LP 一体型潮流計算
Fig. 4. SLP and Concurrent LP/load flow method.

グ回数に対しては、ばらつきを小さくできる。

実際には複数の設備の故障率を加重することとなるが、その場合のサンプリング 1 回あたりの補正係数は、多重故障の場合は表 2 の例のように、それぞれの設備の故障率の加重倍率の積を用いることになる。

4・2 LP 一体型潮流計算 3・3 節で述べたように、本システムでは供給支障量の算定に、潮流計算 (ニュートンラフソン法 (NR 法)) と LP を繰り返す逐次線形計画法 (SLP) を用いている。しかし、SLP では重大事故時など、系統条件が厳しい場合には解が求められないケースが起こりうる。

SLP では、図 4(a) のように最初の潮流計算の結果を LP の初期値として使用するため、負荷削減なしの潮流解が存在しないような厳しい系統状態では最初の潮流計算が発散し、それ以上計算を進めることができない。また、潮流計算が求まった場合でも、潮流方程式の非線形性が原因となり、潮流計算と LP の繰り返し収束しないという問題が起こることもある。このケースでは、繰り返し数が膨大となり、計算時間の増大をもたらす。従って、こうした事象に対する求解性の向上は、計算精度の向上とともに計算時間の短縮に寄与する。

本システムでは、これに対し LP 一体型潮流計算⁽¹⁶⁾を導入した。LP 一体型潮流計算は、図 4(b) のように LP によって潮流計算と最適化問題を同時に解くものであり、両者の繰り返し問題を回避できるだけでなく、最初の潮流計算が発散するような重大事故に対しても正常に供給支障量を算出できる。本手法の適用に際し、ここでは新たに直交座標系による定式化を用いた。これは、特に重潮流時、すなわち相差角の開いた状態では、直交座標系の方が極座標系に比べて線形性が強く、LP への適用に当たっては収束性が高まると考えられるためである。

LP 一体型潮流計算の考え方は、電圧や潮流制約条件を考慮しながら、LP によって各ノードのミスマッチ (ΔP_{miss} , ΔQ_{miss}) を最小化することにあり、3・3 節で述べた定式化の目的関数が次式となる。

Min:

$$f = - \sum \Delta P_{missi} - \sum \Delta Q_{missi} + g(\Delta P_{missi}, \Delta Q_{missi}, \dots) \dots\dots\dots (10)$$

ここで g は初期値からの動きを抑えるための関数である。

NR 法は動作点を線形化し、制約を考慮せずにミスマッチが零になる点を求めていき、これが存在しない場合には発散する。一方、LP 一体型潮流計算は制約も考慮に入れ、ミスマッチが零に出来ない場合も許容する。負荷ノードで最後までミスマッチが残ればそれは供給支障量となる。このため、LP 一体型潮流計算では、負荷削減量最小化を考慮した潮流解を求めることができる。

NR 法では、電圧修正量の計算部分において、ミスマッチを零にするために必要な電圧の修正量を代数計算で求めるが、LP 一体型潮流計算では、この部分に LP を使用する。そのため、NR 法よりも LP の実行回数が多くなり、SLP でも正常に解が得られる場合には、通常、より多くの計算時間を必要とする。このため、本手法の導入に当たっては、通常の SLP では解が求まらなかった場合にのみ、LP 一体型潮流計算に移るものとした。

4・3 その他の計算時間短縮対策 本システムでは上記以外にも幾つかの計算時間短縮化のための対策を導入している。その中でも特に有効であるのは、バイパス計算と電源単一事故の事前計算である。

(1) バイパス計算 特定の設備故障条件の下で供給支障が生じるかどうかは、多くの場合、需要レベルに依存する。特に今回の信頼度計算においては、地点毎の負荷比率は一定としているため、需要レベルが支配的要因となる。バイパス計算は、特定の設備故障に対して、「ある需要レベルで供給支障が生じないのであれば、それ以下の需要レベルでは供給支障は生じない」という前提のもとで、計算を省略する方法である。

具体的には、設備故障が発生した場合、まずその故障が復旧するまでの期間の中で最大、最小需要を調べ、それぞれの需給条件の下で供給支障の有無をチェックする。最小需要についてもチェックするのは、電源の起動状態の変化

が供給支障に影響するためである。いずれも、供給支障が生じなければ、その故障期間全体に亘って 1 時間毎の事故計算をバイパスする。ただし、途中で、別の故障が発生した場合にはその時点で再度同様な検討をやり直す。

最大需要レベルにおいて供給支障が生じる場合には故障時点の需要レベルを上回る時間帯については毎時間の計算を行う。需要の増加断面では、たとえ結果的には供給支障が生じないとしても計算を続行する。ただし、最大需要を越え、ある需要レベルで供給支障が生じなくなった時点で、その需要レベル以下の時間帯については計算を省略する。

図 5 にバイパス計算の概要を示す。この例では故障発生後の最大需要断面で供給支障が生じる。このため、需要の増加時点では通常計算を続ける。ある需要レベルで供給支障が生じなくなったとすると (A 点)、その後、これ以下の需要レベルの時間帯では供給支障量の算定計算をバイパスする。計算は需要が A 点を上回る B 点から再開される。その後も、供給支障が発生しなくなった需要レベル以下の時間帯は同様に計算を省略する。

(2) 電源単一事故の事前計算 電源は、通常 2～

図 5 バイパス計算

Fig. 5. Bypass calculation.

図 6 電源単一事故の事前計算

Fig. 6. Pre-calculation of single generator failure.

3%の事故（故障）停止確率であり、送電線は電圧階級によって異なるが、275 kV 系統では 0.02 [/100 km/年] 程度の事故率である⁽¹⁷⁾。単位を事故率で表現すると、電源の場合は修理時間を 1 ヶ月として 0.24 [/年] 程度となる。すなわち、電源は基幹系統の送電線などに比べると 10 倍程度事故率が高い。一方、電源は通常、予備力が確保されているため、単一の電源事故で供給支障が生じることは稀である。

系統全体ではかなりの電源数となるため、その単一事故は比較的頻繁に生じる。その都度、計算を行うが結果的には供給支障が生じないケースが多い。このため、電源の単一事故についての供給支障の有無を事前に把握しておくことは計算時間短縮化に寄与する。

ここでは、供給支障の有無のチェック計算に要する時間との兼ね合いから、図 6 のように各週の最大、最小需要レベル毎に事前チェックすることにした。モンテカルロサンプリングの中で、単一の電源事故が発生した場合、該当する週の事前計算結果を参照し、供給支障が生じていなければ系統計算をせずに次の時間に進む。もし供給支障が生じていたり、多重事故が途中で発生した場合は、以後、詳細計算を実行する。

5. モデル検討

5.1 IEEE 信頼度テスト系統とその修正 年間の負荷変動や系統運用を考慮して供給信頼度の定量的解析を行うには様々なデータが必要である。これらが比較的整備されたモデルとして、ここでは図 7 の IEEE 信頼度テスト

図 7 修正 IEEE 信頼度テスト系統

Fig. 7. Revised IEEE reliability test system.

系統⁽¹⁸⁾を用いる。ただし、図中に一例としてあげたような標準的な母線構成をすべてのノードに対して想定するとともに、二次系統の負荷切り替えも考慮可能のように接続状況を想定した。また、電源や送電線の故障率をわが国の実態を踏まえた値に変更している⁽¹⁷⁾。

5.2 計算時間短縮・求解性向上対策の効果 開発したシステムによる信頼度解析例と第 4 章で述べた計算時間短縮、求解性向上対策の効果を示す。

図 8 は一例として負荷地点別の供給支障電力量の計算結果を示す。ノード 8 の信頼度が特に悪いことがわかる。この図は 15,000 年のサンプリングによる結果で、(7) 式に基づく相対誤差は 4.3% である。また、計算時間は約 30 時間である (Pentium4, 1700 MHz)。

この計算結果は、すでに幾つかの (後述する表 3 の (a) ~ (d)) 計算時間短縮化対策を適用済みの結果であるが、以下、第 4 章で述べた各種対策の効果を具体例で評価し、実際の適用指針を得ることとする。

表 3 に、第 4 章で述べた以外の対策、すなわち、(b) : LP 計算モジュールの一体化、(d) : LP 収束判定基準の緩和、(f) : PQ 分割潮流計算法の P のみを用いた計算、も含めた計算時間短縮、求解性向上策を示す。表 3 で、(a) ~ (d) はシステムに通常に組み込まれており、以下、その状態での

図 8 負荷地点別供給支障電力量（二次系統負荷切り替えなし）

Fig. 8. EENS of each load nodes (no load switching in sub-transmission network).

表 3 計算時間短縮化・求解性向上対策

Table 3. Measures to improve calculation time and solvability.

set as default	(a) Bypass calculation
	(b) Built-in LP module (LP module is included in the main program to avoid data exchange using input/output file)
	(c) Pre calculation of single generator failure
	(d) Relaxation of convergence tolerance of LP
option	(e) Important sampling
	(f) Calculation based on active power (System evaluation is carried out using only active power elements of PQ decomposition method)
	(g) Concurrent LP/load flow method

図 9 計算時間短縮化効果

Fig. 9. Evaluation of calculation speed up.

図 10 加重サンプリングの効果 (電源故障率 2 倍)

Fig. 10. Effects of important sampling (gen. failure rate: $\times 2$).

計算をベースと呼ぶことにする。また、(e)～(g)は選択となっている。このため、評価の方法として、(a)～(d)については、それぞれの対策を行わなかった場合、(e)～(g)は、対策を行った場合の効果を、ベース((a)～(d)を実施済み)と相対比較することとした。

図 9 は相対誤差が約 7.5%時点 (ベース 5000 年計算相当)での結果である。EENS の値は、(e)を除いて若干高めであるが、これは、この時点では十分には収束していないためである。しかし、各種の計算時間短縮化対策を行っても精度への影響は少ないと言える。計算時間の短縮化に最も効果があるのはバイパス計算である。また、有効電力のみの計算に限ればかなり高速化する。電源の単一事故の事前計算や加重サンプリング、LP 一体型潮流計算も有効である。

加重サンプリングは加重の値によって効果が異なるが、ここで対象としたモデル系統では電源事故の影響が供給支障に影響することから、一例としてすべての電源の故障率を 2 倍にすることとした。図 10 は加重を行わない場合と行った場合のそれぞれについてランダムシードを 5 通り変えて EENS の収束状況を調べたものである。加重することによってシードによる収束のパラツキが抑えられ、少ない

図 11 負荷の重要度の考慮

Fig. 11. Effects of importance of load.

サンプリングで精度が得られることがわかる。

有効電力のみに着目した計算では電圧問題に由来する供給支障が除外されてしまうが、特に電圧問題が厳しい系統条件でなければ、図 9 からわかるように系統全体としての信頼度指標としてはそれほどの違いはない。しかし、図 11(a) に示すように、負荷地点毎の信頼度指標に違いが生じることがある。これは、有効電力のみを考える場合とそうでない場合とでは、全体としてはほぼ同じ供給支障電力量であっても最適化の過程が異なるため、別の解に収束してしまう場合があるためである。これは有効電力のみの計算による固有の問題ではなく、通常の計算でも生じうる。

こうした計算上の問題を回避する 1 つの方法としては負荷の重要度の考慮があげられる。図 11(b) は負荷地点 2, 5, 7, 8 の重要度を相対的に低くした結果であり、少なくとも供給支障量の大きさの順位は一致する。

6. おわりに

基幹系統の静的な供給信頼度を時系列モンテカルロ法によって解析するシステムを開発した。開発したシステムは静的な系統問題とされる潮流、電圧、周波数などの異常に起因する供給支障のリスク指標を負荷地点毎に算定できる。本システムの特徴は時間軸に沿った需給調整や事故後の復旧操作など、系統運用面を考慮している点であり、設備構成に加えて、信頼度面から見た系統運用の評価も可能である。また、モンテカルロ法の適用に伴う計算時間の問題に対処するため、さまざまな計算時間短縮化手法を開発・適用している。

電力供給を取り巻く環境変化とともに、今後、信頼度とコストの調和を図ることがますます重要になると考えられる。本システムはそのための 1 つの有用なツールになるものとする。

大規模系統の解析となると現状では計算時間について、さらなる短縮化が望まれる。並列処理や解析結果の相対比

較に特化したパラツキ抑制方策など、今後は適用面での対応も重要と考える。

なお、本研究を進めるにあたっては横浜国立大学大学院工学研究院電気電子と数理情報分野 大山 力教授、東京理科大学工学部第一部電気工学科 内田直之教授、電中研 竹中 清氏から貴重なご助言とご協力を得ました。ここに謝意を表します。

(平成 15 年 9 月 18 日受付)

文 献

- (1) M.T. Schilling, A.M. Leite da Silva, R. Billinton, and M.A. El-Kady: "Bibliography on power system probabilistic analysis (1962-88)", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.5, Issue 1, pp.1-11 (1990-2)
- (2) R.N. Allan, R. Billinton, A.M. Breipohl, and C.H. Grigg: "Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation: 1987-1991", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.9, Issue 1, pp.41-49 (1994-2)
- (3) R. Billinton, M. Fotuhi-Firuzabad, and L. Bertling: "Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation 1996-1999", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.16, Issue 4, pp.595-602 (2001-11)
- (4) I. Kurihara, K. Matsumoto, and T. Tanaka: "Development of Sub-transmission Network Probabilistic Reliability Analysis System", *T. IEE Japan*, Vol.117-B, No.4, pp.585-593 (1997-4) (in Japanese)
栗原郁夫・松本一・田中敏幸:「二次系統の供給信頼度解析システムの開発」, 電学論 B, 117, 4, pp.585-593 (1997-4)
- (5) K. Naito, T. Sugiyama, and S. Morozumi: "Development of Reliability Analysis System of Transmission Network under Primal Substations", *T. IEE Japan*, Vol.113-B, No.10, pp.1135-1142 (1993-10) (in Japanese)
内藤雄順・杉山智也・諸住 哲:「電力負荷送電系統の供給信頼度評価システムの開発」, 電学論 B, 113, 10, pp.1135-1142 (1993-10)
- (6) K. Kunitomi, I. Kurihara, S. Tachino, and T. Watanabe: "Evaluation of More Effective Utilization of Transmission Facilities Based on Reliability Analysis", *T. IEE Japan*, Vol.119-B, No.1, pp.40-46 (1999-1) (in Japanese)
國富一良・栗原郁夫・館野澄夫・渡辺 勉:「供給信頼度解析に基づく送電設備有効利用策の評価」, 電学論 B, 119, 1, pp.40-46 (1999-1)
- (7) S. Fukutome, H. Azuma, T. Saishoji, M. Yasuda, H. Saito, K. Ogimoto, and L. Chen: "Fast power system reliability evaluation by Monte Carlo method", *T. IEE Japan*, Vol.122-B, No.3, pp.369-374 (2002-3) (in Japanese)
福留 潔・東 仁・最勝寺智子・安田正史・斉藤 祐・荻本和彦・陳 洛南:「モンテカルロ法による電力系統の高速な信頼性評価法」, 電学論 B, 122, 3, pp.369-374 (2002-3)
- (8) I. Kurihara: "Power System Reliability Evaluation under the Electricity Market", *T. IEE Japan*, Vol.120-B, No.7, p.919-922 (2000-7) (in Japanese)
栗原郁夫:「電力自由化のもとでの供給信頼度評価」, 電学論 B, 120, 7, pp.919-922 (2000-7)
- (9) I. Kurihara, M. Nagata, and N. Miyaguchi: "Development of Power System Reliability Analysis Program", Proc. of Annual Conf. on Power and Energy, IEE Japan, No.157 (1999) (in Japanese)
栗原郁夫・永田真幸・宮口直樹:「基幹系統の静的供給信頼度解析システムの開発」, 平成 11 年度電気学会 B 部門大会, No.157 (1999)
- (10) I. Kurihara, N. Uchida, and T. Okada: "Probabilistic Reliability Analysis of Composite Systems with Considering Small Signal Stability", The Papers of Technical Meeting on PE and PSE, IEE Japan, PE-01-63, PSE-01-57, 2001 (in Japanese)
栗原郁夫・内田直之・岡田俊之:「定態安定度を考慮した基幹系統の確率的信頼度解析」, 電気学会系統技術研資, PE-01-63, PSE-01-57 (2001)
- (11) A. Takehara I. Kurihara, and K. Takenaka: "Solvability Improvement of Reliability Analysis Program for Trunk Transmission Systems in case of Extremely Severe Contingencies," Proc. of ICEE (2003)

- (12) 塩見 弘: 信頼性工学入門, 丸善 (1972)
- (13) M. Matsumoto and T. Nishimura: "Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator", *ACM Trans. Modeling & Computer Simulation*, Vol.8, No.1, pp.3-30 (1998-1)
- (14) N. Uchida and T. Nagao: "A New Eigen-Analysis Method of Steady-State Stability Studies for Large Power Systems: S Matrix Method", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.PWRS-3, No.2, pp.706-714 (1988)
- (15) 津田孝雄: モンテカルロ法とシミュレーション, 信風館 (1989)
- (16) L.Z. Yao, G. Strbac, X.P. Zhang, R. Allan, M. Bradley, H.B. Wan, and P. Turner: "A Concurrent Optimal Power Flow for Enforcing of System Solvability, Voltage and Thermal Constraints", 13th PSCC, pp.351-357 (1999)
- (17) 資源エネルギー庁公益事業部電力技術課, 原子力安全・保安院電力安全課: 電気保安統計
- (18) IEEE Committee Report: "IEEE Reliability Test System", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, Vol.98, pp.2047-2054 (1979)

付 録

加重サンプリング

モンテカルロ法は数学的には積分の近似値を求める手法と考えられ、以下の(付 1) 式を $[0, 1]$ で一様分布する乱数 ξ を用いて(付 2) 式のように推定することに他ならない。

$$I = \int_0^1 f(x) dx \dots\dots\dots (付 1)$$

$$I = E(f) \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(\xi_i) \dots\dots\dots (付 2)$$

ここで、新たに $[0, 1]$ に確率密度 $g(x)$ で分布する乱数 η を考える。

$$I = \int_0^1 f(x) dx = \int_0^1 \frac{f(x)}{g(x)} g(x) dx \dots\dots\dots (付 3)$$

$$I = E \left\{ \frac{f(x)}{g(x)} \right\} \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f(\eta_i)}{g(\eta_i)} \dots\dots\dots (付 4)$$

(付 4) 式による推定値の分散 $V(I)$ は,

$$V(I) = \frac{1}{N} \left\{ \int_0^1 \frac{(f(x))^2}{g(x)} dx - I^2 \right\} \dots\dots\dots (付 5)$$

となり,

$$g(x) = f(x)/I \dots\dots\dots (付 6)$$

の時に分散は 0 になる。現実には I の値が不明であるためこれは実現できないが、 $g(x)$ を $f(x)$ に類似した分布とすること、すなわち f の値が大きな x に対しては、より頻繁にサンプリングすることで分散の低減が達成できる。

栗原 郁 夫 (正員) 1953 年 6 月 5 日生。1982 年 3 月東京大学大学院電気工学専門課程博士課程修了。同年(財)電力中央研究所入所。1986~1987 年アメリカ合衆国テキサス大学アーリントン校客員研究員。主として電力システムの計画・運用技術に関する研究に従事。工学博士。1992, 1998 年電気学会論文賞受賞。IEEE Senior Member。

竹 原 有 紗（正員）1977 年 1 月 11 日生。2001 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年（財）電力中央研究所入所。主として電力システムの計画・運用技術に関する研究に従事。

加 藤 安 紀（正員）1971 年 2 月 17 日生。1995 年 3 月東京工業大学大学院電気電子工学専攻修士課程修了。同年 4 月中部電力（株）入社。現在，同社技術開発本部にて，研究企画業務に従事。

中 地 芳 紀（正員）1968 年 4 月 1 日生。1992 年 3 月武蔵工業大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月中部電力（株）入社。現在，同社電力技術研究所電力ネットワークグループに所属。主として，電力システムの解析，安定化制御技術に関する研究に従事。

岩 淵 直 幸（正員）1973 年 1 月 19 日生。1995 年 3 月日本大学理工学部電気工学科卒業。同年（株）電力計算センター入社。主として電力系統解析に関する業務に従事。