

電力系統の運用計画決定における 信頼性と経済性の協調 (I)*

山城 迪**

(昭和50年4月18日受理)

Coordination of Reliability and Economy in the Operation Planning of Power Systems (I)

by Susumu YAMASHIRO

The reliability assessment of power systems has become important with their rapid growth and increasing complexity. So, about the short-range schedule of power system operation, advance from the deterministic and economic schedule, we must determine the short-range schedule of power systems operation from the stand point of co-ordination of economy and reliability considering random elements within power system.

In this paper, we propose a new reliability index for the short-range operation and consider the schedule of operation involving the co-ordination of economy and reliability.

At first, in relation to the well-known long-range Loss of Load Probability (LOLP) and it's set value, we consider the set value of short-range LOLP and it's equivalent Security level.

Then, we introduce a new index Security Margin, which can evaluate how an operating schedule can attain it's reliability goal and refer to the method to determine the co-ordinated operating schedule using this index.

Applying this method to the model power system, we prove the usefulness of the proposed method.

1. ま え が き

電力系統の運用を自動化しようとする試みは、デジタル計算機の出現と歩調を合わせ、いわゆる経済運用から始まったことはよく知られている。米国における1954年の経済負荷配分装置の運転開始以来、自動化は一層進展し、その内容も総合自動化と称せられるように、経済運用はもとより、負荷一周波数制御、電圧一無効電力制御、さらには、信頼度制御へと発展している。

* 電気学会全国大会で発表 (50年4月 九州大学)

** 北見工業大学電気工学科

この信頼度制御に関しては、電気学会の給電専門委員会でまとめた報告書¹⁾があり、それによると、信頼度制御とは「電力系統における事故などの影響を最小限にとどめる目的で、常時から行われる予防的な制御、事故発生時の緊急時における主として系統の安定性確保を目的とした制御、その後の復旧を迅速に行うためのあらゆる制御」であって、その内容は、現時点で考え得る電力系統自動化の最終目標であるといわれ²⁾、従って、これと、前述の自動化諸項目とが有機的に結合されてはじめて総合自動化が完成すると考えられる。

1966年のH. D. Limmerの論文³⁾以来、今日まで、信頼度制御に関する多くの研究が行われており、その一部はすでに実施段階にあるが、その大部分は、いわゆるオンライン制御に関するものである。

これは、信頼度制御の内容が、常時運用の予防制御、および事故時の緊急制御、復旧制御に主体がおかれているから当然のことといえるが、ただ、ここで忘れてはならない点は、これらの各制御が無理なく実施されるためには、前日等における運用計画決定(オフライン)の段階で、供給信頼度維持のための配慮が充分なされているという条件が満たされていることが必要である。

このような信頼性を考慮した信頼度運用計画の決定は、経済性と信頼性の協調の上になされるべき問題であるが、著者の知る限りにおいては、この分野の研究はほとんどなされていない。

本研究は、最終的には、経済性と信頼性の協調制御のあり方を考察することを目標としているが、ここでは、協調制御を考えるうえでの基礎となる短期間の信頼度指標について考察する。

従来、長期間(年単位)の信頼度指標としては、電力不足確率などがすでに広く認められており、これらは、例えば、長期的な展望の上立った、系統拡充計画等によく用いられてきた。

一方、日間等の短期間を対象にした信頼度指標は、わずかにPatton氏によって文献(4)で示されている程度である。

さて、Patton氏の提唱するセキュリティ関数は、任意の時点における系統の信頼性評価には都合がよいが、一方、これを用いた運用計画が具体的にどういう意味を持つかということをも明確に説明できないうらみがある。

例えば、運用計画決定の際の制約条件として、セキュリティ関数にある上限値を設定した場合に、その設定値が、具体的に何を意味するのか明白にとらえがたい。これは、同じ信頼性の目標値であっても、長期間の信頼度算定においてよく用いられる電力不足確率の具体的な目標値、例えば、10年1日、などと比較してみると一層明らかになる。

以上の考察から、本論文では、まず、すでに広く認められている長期間の電力不足確率の目標値を手がかりとして、短期運用における電力不足確率の目標値の決定について考察し、こ

の目標値と等しい意味を持つセキュリティレベルの設定について述べる。次に運用計画の信頼性を評価するために、セキュリティ余裕なる指標を定義し、これを用いた経済性と信頼性の協調による計画決定法を示し、最後に、モデルシステムへの適用例により、提案する指標の有用性を明らかにする。

2. 短期間信頼度指標 (セキュリティ余裕)

短期間の系統信頼性を評価するために、Patton氏は次のセキュリティ関数を提唱している⁴⁾。

$$S(t) = \sum_l P_l(t) Q_l(t) \quad (1)$$

ここで、 $P_l(t)$: 時刻 t において系統が状態 l にある確率。 $Q_l(t)$: 状態 l が系統のセキュリティを破る確率。

セキュリティの破壊とは、具体的には、供給力不足、電圧異常、機器の過負荷などがあげられるが、第1章ですでに述べたように、短期間の信頼度目標をすでに広く認められている長期間の電力不足確率の目標値を基礎として考察するために、ここでは、 $S(t)$ は供給力不足の項からのみ成り立つ場合を考えるものとする。

さて、(1) 式の状態確率 P_l は系統を構成する発電機の考察初期時点における状態確率と以後の運用計画がわかれば、マルコフ過程によって、容易に求めることができる⁵⁾。

ところで、以後の解析では、日間をいくつかの時間帯に分割し離散的な取り扱いをするので、セキュリティ関数についても、同様に離散的表示を求めておく。

いま、第 n 時間帯における並列発電機群 i を ${}^n u^i$ で表わし、 ${}^n u^i$ のセキュリティ関数を S_i^n とすると

$$S_i^n = \sum_l P_l^n \cdot Q_l^n \quad (2)$$

一方、考察の初期時点から第 n 時間帯までの運用計画がすでにわかっているものとして、 ${}^n u^i$ に到る運用計画についての、合計 n 区間の電力不足確率を SP_i^n とすれば、時間帯幅を Δt として

$$SP_i^n = \frac{\sum_{k=1}^n S_{i-Route}^k \times \Delta t}{n \times \Delta t} = \frac{\sum_{k=1}^n S_{i-Route}^k}{n} \quad (3)$$

ここで、添字 $i-Route$ は、 ${}^n u^i$ に到る運用計画に含まれている並列発電機群の系列を意味する。

いま、この電力不足確率が満足しなければならない上限値を、 \overline{SP}_i^n とすれば次式が成立する。

$$SP_i^n = \frac{\sum_{k=1}^n S_{i-Route}^k}{n} \leq \overline{SP}_i^n \quad (4)$$

または

$$S_i^n = n \times SP_i^n - \sum_{k=1}^{n-1} S_{i-Route}^k \leq n \times \overline{SP}_i^n - \sum_{k=1}^{n-1} S_{i-Route}^k \quad (5)$$

従って、第 n 時間帯の並列発電機群 i のセキュリティ関数の許容上限値（これをセキュリティレベルと呼ぶ）を次のように定めるなら、

$$\overline{S}_i^n = n \times \overline{SP}_i^n - \sum_{k=1}^{n-1} S_{i-Route}^k \quad (6)$$

運用計画が n 区間の電力不足確率の目標値を満足しているか否かは、時間帯 n におけるセキュリティ関数の値がセキュリティレベルを満足するか否かによって判定されることがわかる。

(6) 式から、セキュリティレベルは、一般に、時間帯および並列発電機群の関数であり、また、計画された運用によってその値が左右される点に注意されたい。

ここで、問題となるのは n 区間の電力不足確率の目標値をどう設定するかである。

一般に電力不足確率は

$$\text{電力不足確率} = \frac{\text{供給力不足時間の期待値}}{\text{考察期間の総時間数}} \quad (7)$$

で表わされるが、例えば、長期間の電力不足確率の目標値を 10 年 1 日 (2.778×10^{-4}) と指定する場合には、これは、あくまでも全考察期間（今の場合 10 年）についての目標値であって、考察初期時点から任意の時点までの、いわば部分区間については何等言及していないのが普通である。しかしながら、全期間の目標値を達成するためには、どの部分区間をとりあげても、全期間の目標値を満足していることが望ましい。

このことから、短期運用における n 区間の電力不足確率の目標値設定の一つの方法として、まず長期間の電力不足確率の目標値 ($\overline{\text{LOLP}}$) を選んでみよう。

このとき (6) 式は次のようになる。

$$\overline{S}_i^n = n \times \overline{\text{LOLP}} - \sum_{k=1}^{n-1} S_{i-Route}^k \quad (8)$$

ところで、 $\overline{\text{LOLP}}$ は定常時の状態確率をその算定の基礎としているから、セキュリティ関数が過渡状態確率から求まることを考えると、直感的に、短期運用については、(8) 式のセキュリティレベルは大きすぎるように思える。

そこで、いま、セキュリティ関数の算定も定常状態確率で行い、次式のようにセキュリティ関数およびレベルを定めるものとしよう。

$$[S_i^n]_{stat} = \sum_l [P_l^n]_{stat} \times Q_l^n \quad (9)$$

$$[\overline{S}_i^n]_{stat} = n \times [\overline{SP}_i^n]_{stat} - \sum_{k=1}^{n-1} [S_{i-Route}^k]_{stat} \quad (10)$$

添字 stat は定常値を意味する。

もし、上式でレベル $[\overline{SP}_i^n]_{stat}$ を \overline{LOLP} とおくと

$$[S_i^n]_{stat} = n \times \overline{LOLP} - \sum_{k=1}^{n-1} [S_{i-Route}^k]_{stat} \quad (11)$$

上式は定常状態確率を用いて議論できるような場合については正しい評価 (セキュリティレベルが長期間の電力不足確率の目標値と等価になるという意味で) を与えるものであり、我々は、これを手がかりとして、短期間電力不足確率の目標値を求めることにする。

つまり、短期運用において過渡状態確率に基づく n 区間の目標値 SP_i^n が、定常状態確率による \overline{LOLP} と等価な目標値となるには、両者はどのような関係を満足すべきかを考えてみよう。

いま、ここで、セキュリティレベルとセキュリティ関数との差によって求められる量をセキュリティ余裕と定義する。我々の短期運用については(6)式から、また、定常状態確率を用いる場合には(11)式によってセキュリティ余裕は各々次のようになる。

$$\Delta S_i^n = \bar{S}_i^n - S_i^n = n \times (\overline{SP}_i^n - SP_i^n) \quad (12)$$

$$[\Delta S_i^n]_{stat} = [\bar{S}_i^n]_{stat} - [S_i^n]_{stat} = n \times (\overline{LOLP} - [SP_i^n]_{stat}) \quad (13)$$

上式で定義されるセキュリティ余裕は、電力不足確率の目標値に対して、どの程度供給力が確保されているかということの保障の度合を示すパラメーターと考えることができ、このセキュリティ余裕の大きさによって、運用計画がどの程度信頼度目標を達成しているかを評価することができる。また、この値を常に正に保つことは、運用計画がセキュリティレベル、従って、電力不足確率の目標値を満足することに等しい。

ところで、いま、ある運用計画について、任意の時点の任意の条件 (負荷および並列発電機群の構成) における系統のセキュリティ余裕を算定する場合を考えると、その算定法がどうあろうと (過渡状態確率を用いようが、定常状態確率を用いようが)、セキュリティ余裕の大きさが同じであればいいかえると、

$$[\Delta S_i^n]_{stat} = \Delta S_i^n \quad (14)$$

が成立するように、セキュリティレベル \bar{S}_i^n を決めるならば、一つの運用計画の信頼性がその算定法の如何によらず、常に同じセキュリティ余裕値として評価されるという意味において、 \bar{S}_i^n は $[S_i^n]_{stat}$ と等価となり、従って、短期運用における \overline{SP}_i^n は、定常状態確率に基づく \overline{LOLP} と等価な目標値となる。(12)~(14)式から、レベル \bar{S}_i^n は

$$\bar{S}_i^n = [S_i^n]_{stat} - ([S_i^n]_{stat} - S_i^n) \quad (15)$$

また、(6)、(11)式から

$$\overline{SP}_i^n = \overline{LOLP} - \frac{1}{n} \left\{ \sum_{k=1}^n [S_{i-Route}^k]_{stat} - \sum_{k=1}^n S_{i-Route}^k \right\} \quad (16)$$

(15)、(16)式から、 \overline{LOLP} との関連において、短期運用におけるセキュリティレベルおよび電力

不足確率の目標値が決定される。明らかに、 $\bar{S}_i^n < [\bar{S}_i^n]_{stat}$, $\overline{SP}_i^n < \overline{LOLP}$ であり、かつ、 n が十分大きい場合には、 \bar{S}_i^n は $[\bar{S}_i^n]_{stat}$ に、また、 \overline{SP}_i^n は \overline{LOLP} に等しくなることがわかる。

一方、(8)式によるセキュリティ余裕 ΔS_i^n は

$$\Delta S_i^n - \Delta S_i^n = n \times (\overline{LOLP} - \overline{SP}_i^n) \quad (17)$$

であって、 $\overline{SP}_i^n < \overline{LOLP}$ の関係から、 $\Delta S_i^n > \Delta S_i^n$ となる。これが先にセキュリティレベルを大きくとりすぎると述べたことの説明である。

この章の結論として、運用計画の信頼性は新しい指標、セキュリティ余裕によって評価されることを示し、長期間電力不足確率の目標値 \overline{LOLP} を全期間にわたって満足することは、各時点におけるセキュリティ余裕を常に正の値に保つたことに等しいことを述べ、また、短期運用における電力不足確率の目標値は(16)式から求まり、これを満足する運用計画が長期運用における目標値 \overline{LOLP} を達成するために望ましいことがわかった。

最後に、セキュリティ余裕算定のための漸化式を求めておく。

並列発電機群が ${}^{n-1}\mathbf{u}^j$ から ${}^n\mathbf{u}^i$ になる場合には、(6), (16)式から

$$\bar{S}_i^n = \overline{LOLP} - [\bar{S}_i^n]_{stat} + S_i^n + \Delta S_j^{n-1}$$

従って次式が成立する

$$\Delta S_i^n = \overline{LOLP} - [\bar{S}_i^n]_{stat} + \Delta S_j^{n-1} \quad (18)$$

3. 信頼性と経済性の協調による運用計画

前章では、長期間電力不足確率の目標値を手がかりにして、短期運用に用いるセキュリティ関数とその許容レベルを求め、さらにセキュリティ余裕を定義した。この章では、この短期間信頼度指標の適用例として、負荷予測誤差および発電機の偶発事故を考慮しつつ、経済性と信頼性の協調の上に立った、火力系統の短期運用計画を求めることにする。

まず、経済性の評価であるが、コストを(燃料費+起動費)から成るものとして、日間の第 n 時間帯における並列発電機群 ${}^n\mathbf{u}^i$ のコストを次のように決定する。

いま、 ${}^n\mathbf{u}^i$ を構成する各ユニットの偶発事故発生の組み合わせを考え、これに番号 l を割り当て、状態 ST_l とし、 ST_l が生ずる確率を P_l で表わす。次に負荷予測誤差を正規分布に従うものとし、状態 ST_l のコストの期待値を $r_l^{(5)}$ とすると、 ${}^n\mathbf{u}^i$ のコストの期待値は次のようになる。

$$F_i^n = \sum_{l \in \Omega} P_l \cdot r_l / \sum_{l \in \Omega} P_l \quad (19)$$

ここで、 Ω は運転可能な状態 ST_l の集合を示す。

Dynamic Programming によると、 n 時間帯未までの累積コストは、 $n-1$ 時間帯の並列発電機群を ${}^{n-1}\mathbf{u}^j$ とし、次のように表わすことができる。

$$\phi^n(n^{-1}\mathbf{u}^j, \mathbf{u}^i) = F_i^n + \Phi^{n-1}(n^{-1}\mathbf{u}^j) \quad \Phi^n(\mathbf{u}^i) = \min_{n^{-1}\sigma^j} \{\phi^n(n^{-1}\mathbf{u}^j, \mathbf{u}^i)\} \quad (20)$$

なお、起動費は停止時間の一次式で近似⁶⁾しかつ、起動に必要な最小停止時間の制約を考慮する場合には、文献(6)の手法によって経済的に最適な運用を求める。

次に、上式から求めた運用計画が、望ましい信頼度を確保しているか否かを検討の必要がある。

そのためには、まず、 \mathbf{u}^i のセキュリティ関数、 S_i^n を求めなければならない。状態確率 P_i は各ユニットの初期状態確率がわかれば、マルコフ過程によって求められる。

また、 Q_i の決定は次のようにして行う。いま、正規分布で表わされる負荷を第1図のように7区間に分割し、区間 m ($-3, \dots, 0, \dots, 3$)の負荷の大きさと、状態 ST_i の可能最大出力とを比較し

$$D_m = \begin{cases} 1: & \text{負荷が大きい場合} \\ 0: & \text{負荷が小さい場合} \end{cases} \quad (21)$$

とする。また、区間 m の確率を PQ_m とすれば

$$Q_i = \sum_{m=-3}^3 D_m \cdot PQ_m \quad (22)$$

従って、(2)式を用いれば S_i^n が求まる。一方、適当な長期間電力不足確率の目標値 \overline{LOLP} を設定すれば、前章の議論からセキュリティレベルが逐次決定されるから、我々は、 S_i^n が \overline{S}_i^n を越えるかどうかを検討すればよい。このことは、(18)式のセキュリティ余裕の算定によっても確かめることができる。ここで、もし、 $\Delta S_i^n < 0$ 、すなわち、 $S_i^n > \overline{S}_i^n$ であれば、この運用計画に対して、あるペナルティコスト γ を与えて、(20)式の累積コストを

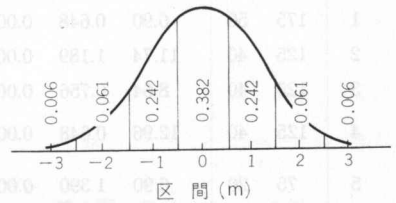
$$\phi^n(n^{-1}\mathbf{u}^j, \mathbf{u}^i) = F_i^n + \Phi^{n-1}(n^{-1}\mathbf{u}^j) + \gamma \quad (23)$$

とすれば、(23)式を用いて、経済性と信頼性の協調による運用計画を決定することができる。

4. 試算例

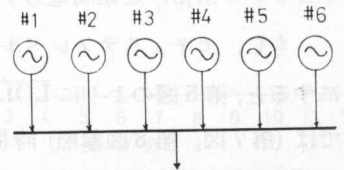
第2図および第1表のモデル系統に本手法を適用してみた。第3図に日間の負荷予測曲線を期待値で示す。負荷予測誤差は、その標準偏差を期待値の1%とした。

また、状態 ST_i については、発電機2台までの同時故障を考慮したが、3台以上の同時故障発生は無視した。なお、起動停止火力#4~#6の起動に必要な最小停止時間はすべて6時間とした。



第1図 正規分布の7分割近似

Fig. 1. Senen step approximation of normal distribution.



第2図 モデル系統

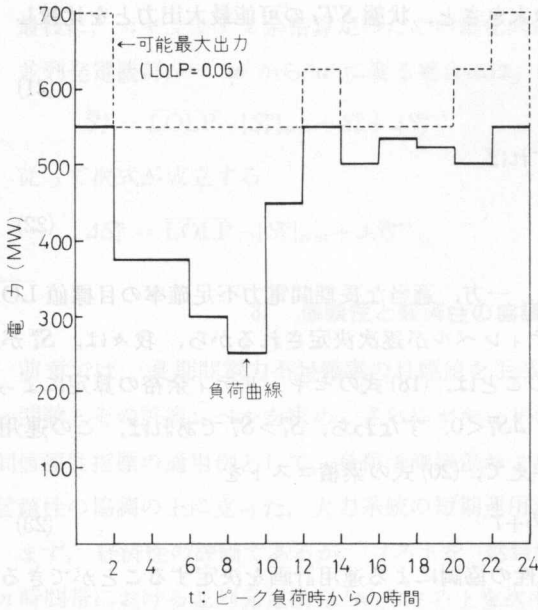
Fig. 2. Model power system.

第1表 発電機特性定数

Table 1. Characteristic constants of units

発電機 No.	出力 (MW)		燃料費 $F=a+bG+cG^2$ (千円)			起動費 k (千円/h)	事故発生率 (λ)	復旧率 (μ)	運転確率 $A = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$	起動失敗確率 (P_s)	停止時の 事故発生率 (P_a)
	G_{max}	G_{min}	a	b	c						
1	175	50	6.90	0.648	0.00105	—	0.0005	0.02	0.9756	—	—
2	125	40	11.74	1.189	0.00110	—	0.0006	0.02	0.9709	—	—
3	125	40	8.64	0.756	0.00259	—	0.0006	0.02	0.9709	—	—
4	125	40	12.96	0.648	0.00432	5.2	0.0006 (0.0005)	0.02	0.9709 (0.9756)	0.01	0
5	75	20	6.90	1.390	0.00375	3.2	0.0003 (0.0002)	0.02	0.9852 (0.9901)	0.01	0
6	75	20	12.40	1.250	0.00163	3.0	0.0003 (0.0002)	0.02	0.9852 (0.9901)	0.01	0

() は解列時の値を示す。



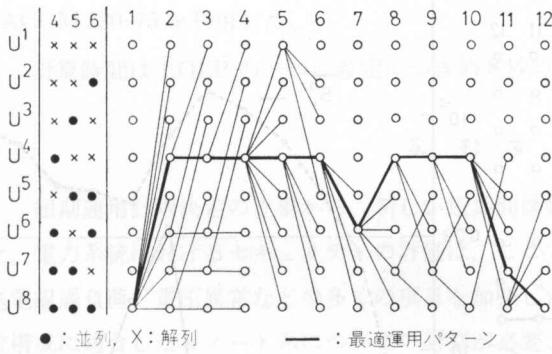
第3図 負荷曲線 (期待値)

Fig. 3. Load pattern.

第4図は $\overline{LOLP}=0.06$, $\gamma=\infty$ とした場合の最適運用パターンの例である。

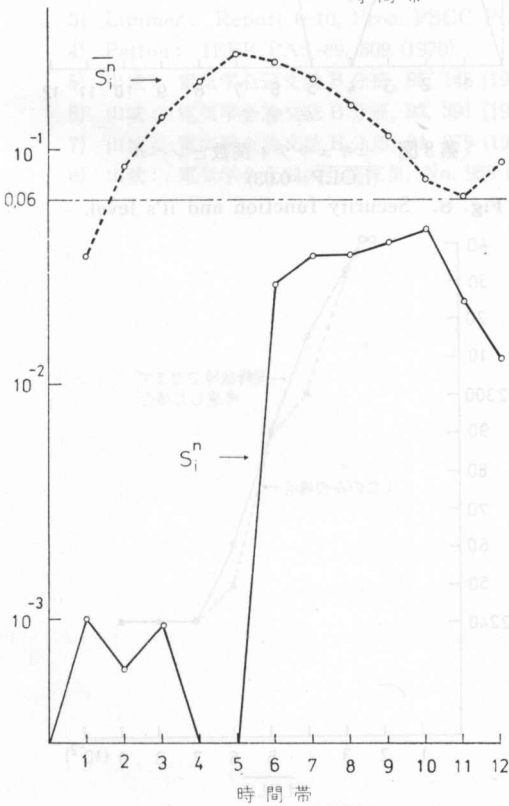
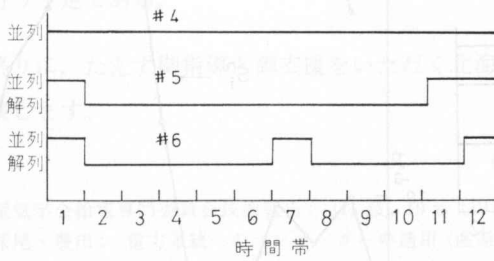
第5図, 第6図は同じ条件での, セキュリティレベル, セキュリティ関数, および, セキュリティ余裕, 短期間電力不足確率の目標値である。

もし, セキュリティレベルを考察期間を通して一定とするなら, 例えば, その値を \overline{LOLP} にすると, 第5図のように $\overline{LOLP}=0.06$ の場合には同様のパターンが得られるが, $\overline{LOLP}=0.03$ では (第7図, 第8図参照) 時間帯7においてペナルティコストが加わる結果, 第7図に示した運用パターンは求まらない。

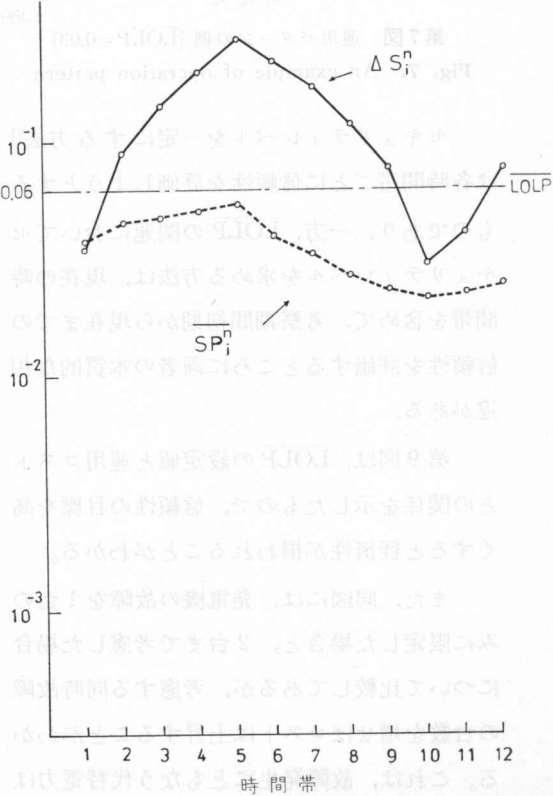


第4図 運用パターンの例 (LOLP=0.06)

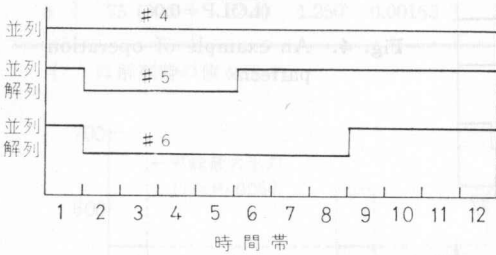
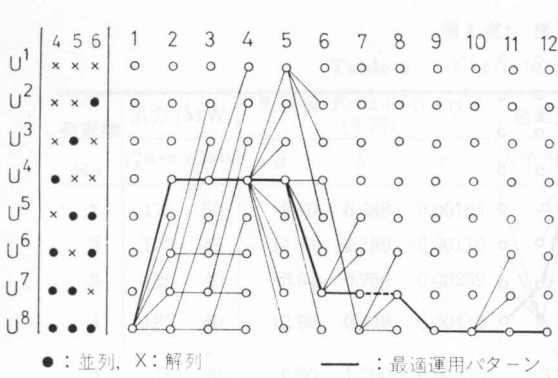
Fig. 4. An example of operation pattern.



第5図 セキュリティ関数 (S_i^n) とレベル (S_i^n)
Fig. 5. Security function and its level.



第6図 セキュリティ余裕 (ΔS_i^n) と電力不足確率の目標値 (SP_i^n)
Fig. 6. Security margin and loss of load probability.



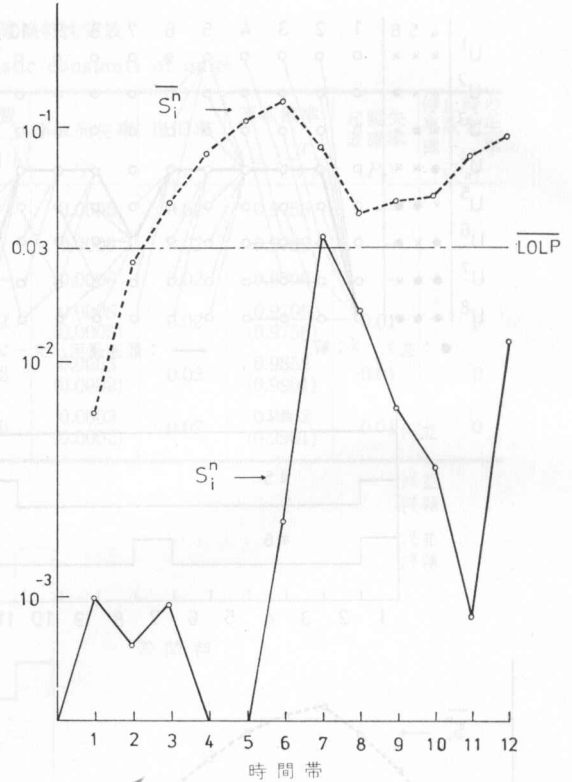
第7図 運用パターンの例 ($\overline{LOLP}=0.03$)

Fig. 7. An example of operation pattern.

セキュリティレベルを一定にする方法⁷⁾は各時間帯ごとに信頼性を評価しようとするものであり、一方、 \overline{LOLP} の関連においてセキュリティレベルを求める方法は、現在の時間帯を含めて、考察期間初期から現在までの信頼性を評価するところに両者の本質的な相違がある。

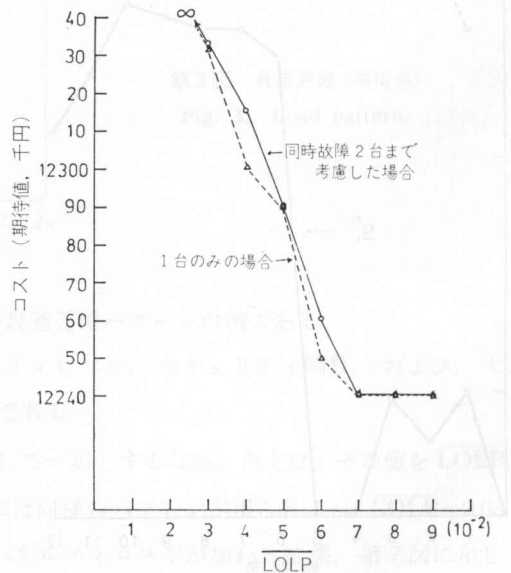
第9図は、 \overline{LOLP} の設定値と運用コストとの関係を示したもので、信頼性の目標を高くすると経済性が損われることがわかる。

また、同図には、発電機の故障を1台のみに限定した場合と、2台まで考慮した場合について比較してあるが、考慮する同時故障の台数を増せばコストは上昇することがわかる。これは、故障発生にともなう代替電力は一般により高価であることから理解される。なお、計算は北海道大学大型計算機センター



第8図 セキュリティ関数とレベル ($\overline{LOLP}=0.03$)

Fig. 8. Security function and its level.



第4図 \overline{LOLP} とコストとの関係

Fig. 9. Relation between \overline{LOLP} and cost.

FACOM 230-75 を利用した。

計算時間は $\overline{\text{LOLP}}$ の一つの設定につき約 8 秒である。

5. む す び

短期運用計画決定の立場から、新しい短期間信頼度指標を提案し、その適用について述べた。電力系統におけるセキュリティの評価は、ここで述べた供給力不足の問題だけではなく、送電線過負荷、電圧異常などの多くの項目を加味したものでなければならない。また現実の系統構成に適合した多ノード系についての考察が必要であり、次回には、これらの点について検討を行う予定である。

終りに、たえず御指導と御支援をいただく北海道大学工学部長、小池東一郎教授に厚く謝意を表します。

文 献

- 1) 電気学会給電専門委員会技術報告：(II 部), 19 号 (1972).
- 2) 深尾・豊田：電力系統へのコンバーターの適用 (産業図書).
- 3) Limmer: Report 6-10, Proc. PSCC Pt. IV (1966).
- 4) Patton: IEEE PAS-89, 509 (1970).
- 5) 山城：電気学会論文誌 B 分冊, **95**, 145 (1975).
- 6) 山城：電気学会論文誌 B 分冊, **93**, 391 (1973).
- 7) 山城：電気学会論文誌 B 分冊, **94**, 279 (1974).
- 8) 山城：電気学会全国大会論文集, No. 958 (1975).