

限定戦略手法によるセキュリティ 指標評価法に関する研究

川原耕治* 佐々木博司**

A Study on Evaluating Security Indices for Outage Works
by the Bounding Method

Koji KAWAHARA* Hiroshi SASAKI**

ABSTRACT

It is necessary for a power system to undertake maintenance works regularly to secure stable power supply, which inevitably cause outage of associated apparatuses. This problem, referred to as the outage planning of an electric power system in this paper, has been so far made based on the knowledge and experiences of planning engineers. However, the scheduling made by the engineers has not been necessarily optimal since there are no rational criterion to judge the results. This paper presents numerical indices reflecting the power system security by which the quality of a proposed outage work plan can be evaluated quantitatively. However, evaluating power supply reliability from one of the indices may cause the following cases: there is little difference in indices among prepared system configurations and it does not probably represent power supply reliability in outage planning. Therefore, we propose combining the proposed indices to comprehensively evaluate power supply reliability. Since a large amount of computational efforts is needed to calculate these indices, the DC load flow by the bounding method is used to alleviate the computational burden without sacrificing the necessary degree of accuracy. The proposed indices are applied to a part of the 110 kV transmission line system. Results obtained have made clear the effectiveness of the proposed indices to the current scheduling based on the just the experience of the maintenance engineers.

キーワード：限定戦略手法，セキュリティ指標，電力設備停止計画，DC潮流計算

Keywords: Bounding method, Security index, Outage planning of electric facilities, DC load flow

1. まえがき

安定な電力供給を確保するためには，電力設備の新規増設・補修・点検等の作業が不可欠であり，停電を伴う作業も必然的に含まれる。停電作業中の系統信頼度を維持するには，雷などの気象条件や電力需要を考慮し，必要に応じて系統切替を検討すると共に，工期短縮の上からも関連する作業を協調して行う必要がある。電力設備停止計画とは，系統構成の弾力性を十分に活用し，作業中の電力供給信頼度（以下，“供給信頼度”と呼ぶ）の低下を防ぎつつ，作業のスケジューリングを

決定する問題である。対象となる停電作業は，作業1件毎に工事主管箇所から提出される作業要求書が電力所等に集められ，総合的な調整が図られている。しかしながら，そこで扱われる情報は，管轄する個々の電力設備から需給バランス等の運用上必要なデータまで多岐にわたり，系統規模の拡大に伴いその量も年々増加していることから，人手によってこれらの情報を整理し最適に調整を図ることは困難である。

これまでに筆者らが提案した停電作業組合せ手順^[5]は，作業要求段階で作業日時を指定しないことを前提

に、供給信頼度が高くなるように系統構成と作業配置を決定するものである。手順の概略は、まず各停電作業に対して、作業日数と必要な作業人数から作業工量を求め、計画期間内で停電作業が重ならないように配置を試みる。次に、予め用意された系統構成について、供給支障量、過負荷量、余裕量の3つのセキュリティ指標を計算し、これら指標値のよい系統構成を選択する。残りの停電作業は、セキュリティ指標値を低下させない期間へ割り当てるものである。

しかしながら、この手順でネックとなるのが、指標計算に費やされる時間である。我々の扱う問題は、いわゆるオフラインの計画問題であるが、数百ノード、数千ブランチに及ぶ実規模の系統になると、単に $n-1$ セキュリティ計算を実行することも時間のかかる処理と成り得る。そこで本論文では、セキュリティ指標算出のために想定故障計算を実行する場合、すべての線路での潮流を求める代わりに、過負荷を生じる可能性のある線路に限定して潮流を求める限定戦略手法^[2]に着目した。本稿では、初めにセキュリティ指標に基づく停止計画立案の概念と指標について述べる。続いて、限定戦略手法について説明し、セキュリティ指標を組み合わせた信頼度評価法を示す。最後に、限定戦略手法の有効性を確認するため例題系統に対するシミュレーションと、筆者らが提案してきた作業停止計画問題へ適用した結果を示す。

2. 供給信頼度を考慮した停止計画

電力系統の運用において、不測の事故による影響を極力抑さえ系統全体の信頼性を高めること、すなわちセキュリティの確保は重要な課題となっている。停止計画においても想定事故に対して事故波及を生じないような系統構成で停電作業を行うことが、高いレベルでセキュリティが維持された状態であると考え、その度合いを反映する指標として以下3つを考慮する。

(1) 供給支障量

供給支障量は、想定事故により負荷母線が系統から分離することによる、供給不可能となる負荷量を総和した量で、次式で与えられる。

$$\sum_{j=1}^{MC} \sum_{i=1}^{MB} \omega_{ij} L_i \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\omega_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{供給支障が生じない場合} \\ 1 & \text{〃 が生じる場合} \end{cases} \quad \dots \dots (2)$$

ここで、 MC : 想定事故数、 MB : 総母線数、 L_i : 母線 i の負荷量、 ω_{ij} : 重み

(2) 過負荷量

過負荷量は線路の潮流上限値を越えて流れる逸脱量である。ここで単純に過負荷量を総和したものをセキュリティ指標として用いると、危険なケースと想定される大きな逸脱量をもつ線路の影響が指標に反映され難い。そこで各線路で生じる過負荷量を2乗し、これらの総和を取った値を利用する。

$$\sum_{j=1}^{MC} \sum_{i=1}^{ML} \left(\omega_{ij} \left(|P_{ij}| - P_{i\max} \right) \right)^2 \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\omega_{ij} = \begin{cases} 0 & |P_{ij}| \leq P_{i\max} \\ 1 & |P_{ij}| > P_{i\max} \end{cases} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 MC : 想定事故数、 ML : 総線路数、 P_{ij} : 事故線路 j の時の送電線 i の潮流、 $P_{i\max}$: 送電線 i の潮流上限値、 ω_{ij} : 重み

(3) 余裕量

過負荷を生じない線路において、線路の潮流上限値と線路潮流との差を余裕量とする。そして次式で与えられるような、想定事故の結果生じる各線路の余裕量の総和をセキュリティ指標として用いる。

$$\sum_{j=1}^{MC} \sum_{i=1}^{ML} \omega_{ij} \left(P_{i\max} - |P_{ij}| \right) \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\omega_{ij} = \begin{cases} 0 & |P_{ij}| \geq P_{i\max} \\ 1 & |P_{ij}| < P_{i\max} \end{cases} \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 MC : 想定事故数、 ML : 総線路数、 P_{ij} : 事故線路 j の時の送電線 i の潮流、 $P_{i\max}$: 送電線 i の潮流上限値、 ω_{ij} : 重み

これらの指標を用いた作業停止計画立案の概念を図1に示す。まず作業要求の段階で、日時・天候が制約となる作業に対してのみ作業日時を指定する。次に、予め用意された最大負荷パターンと発電量および系統構成に対して、1つの作業要求を系統上にマッピングした時の指標を計算する。この時、想定事故計算は停止作業予定の以外の場所で1回線停止を行ったもので、系統のブランチ数を b として、 $b-2$ 回この計算が繰返される。他の系統構成に対しても同様に指標が計算されると、この値に基づいて作業の組み合わせと系統構成が決定される。作業の組合せ方策には、毎日の作業量が平均するように作業要求を配置する平滑化優先や、作業日数を可能な限り減らすように配置するもの等を用意しておき、どれを選択するかは運用者の意思に委ねる。

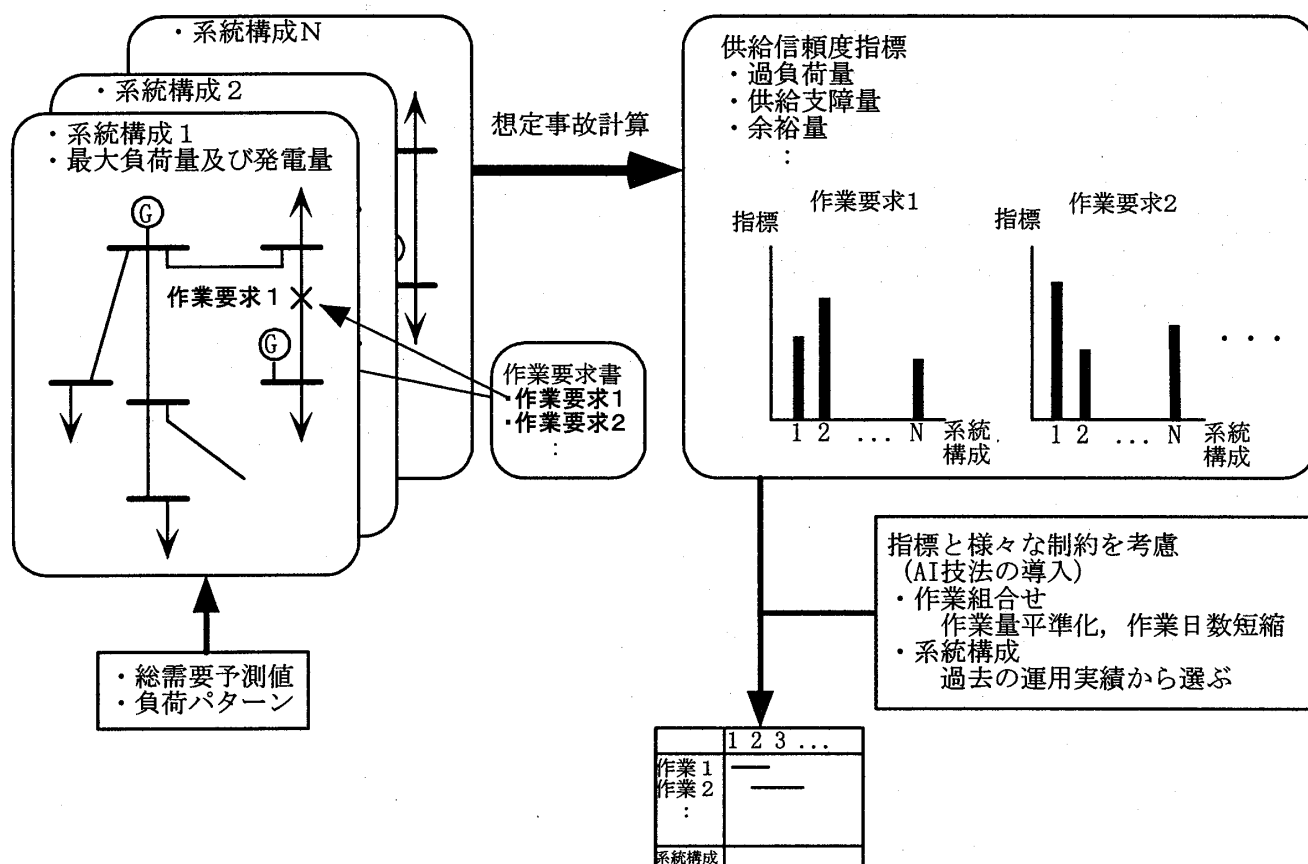


図1 供給信頼度を考慮した停止計画立案の概念

Fig.1 Concept of outage planning considering power supply reliability.

3. 想定事故解析

3.1 概略

想定事故解析は、系統のオンライン情報に基づいて想定事故をシミュレーションし、系統の安全性や事故波及の影響をチェックすることを目的としている。これらの解析で必要不可欠な潮流計算は、入力データとして(1)電力設備の接続関係を表す系統構成に関するデータ、(2)送電線などのインピーダンス、変圧器の電圧変成比などの設備定数に関するデータ、(3)発電機の出力、負荷の有効・無効電力などの系統の運用条件に関するデータを用いて、系統の電圧と潮流の間に存在する電力方程式を解いて、未知の電圧・潮流を求めるものである。一般に、潮流計算は電力方程式を厳密に解いて、電圧、位相角、有効、無効電力潮流を求める交流法と、有効電力潮流の概略値だけを求めるために電力方程式を簡略化した近似式を用いる直流法の2つがある。

本研究で使用する指標を算出するには、基本的に線路の有効電力潮流のみを利用するので、直流法による

潮流計算で十分であるが、この他に事故解析において具備すべき要求として以下のようなものがある。

- 直流法による仮定の範囲内で、想定事故により引き起こされる全ての線路潮流違反の検出
- 1000ノード以上の系統に対してもリアルタイム性を失わない計算速度
- 系統のトポロジー変化への素早い適応性

特に、本研究での想定事故解析は、スケジューリング問題に対して使用するもので、リアルタイム性は要求されないが、対象となる系統構成が多数で、全線路で想定事故を起こす必要があり、計算速度が高速であることが望ましい。また、作業配置を変更した場合、これに対応する僅かな系統トポロジーの変化に対して、全ての線路に関する潮流を求めるのではなく、過負荷などの線路潮流制約を逸脱した線路を高速に検出できることは計画立案にかかる時間短縮に効果的である。そこで、本研究では文献[2]で提案され、上述の(a)~(c)の要求を満たす、限定戦略を用いた想定事故解析手法に補

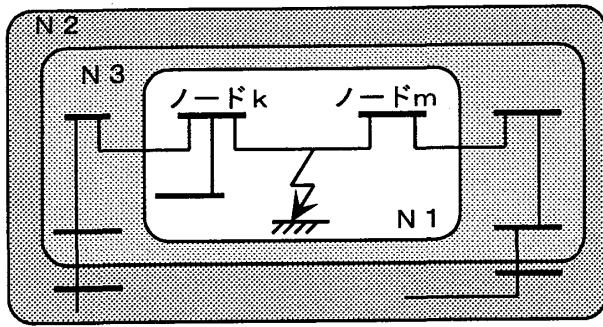


図2 ネットワーク分割例
Fig.2 Example of dividing into subnetworks.

償法を併せて適用する。

3. 2 限定戦略手法

(1) 系統モデル

一般に直流法による電力潮流モデルは次式で与えられる。

$$B' \cdot \Delta\theta = \Delta P \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 B' : $n \times n$ サセプタンス行列, $\Delta\theta$: 母線における位相変化に関する n ベクトル, ΔP : 母線に注入された有効電力変化の n ベクトルである。

任意の想定事故に対して、ノード km 間の線路潮流変化は、

$$\Delta P_{km} = \frac{\Delta\theta_k - \Delta\theta_m}{x_{km}} \dots\dots\dots (8)$$

で与えられる。ここで、 x_{km} : ノード km 間の線路リアクタンス, $\Delta\theta_k, \Delta\theta_m$: それぞれノード k と m における母線電圧位相変化である。

従って、事故後のノード km 間における線路潮流は、

$$P_{km} = P_{km}^0 + \Delta P_{km} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 P_{km}^0 は想定事故前の線路潮流である。

(2) 境界規範

線路 km で事故が起こった場合、系統に対して図2に示すような3つのサブネットワーク, $N1, N2, N3$ を考える。 $N1$ は少なくともノード k と m を含み、これらノードを中心に3ないし4程度の範囲のノードへ拡張したものである。 $N2$ は $N1$ を除いた残りの系統で、 $N3$ は $N1$ と $N2$ を分ける境界ノードの集合で、 $N1$ に含まれる。このとき、 $N2$ に含まれるどの線路 pq に対しても以下の関係

$$|\Delta\theta_p - \Delta\theta_q| < |\Delta\theta_i - \Delta\theta_j| = \Delta\theta^M \dots (10)$$

が成立する。ここで、 $\Delta\theta_i$ と $\Delta\theta_j$ はそれぞれ、 $N3$ 内の最

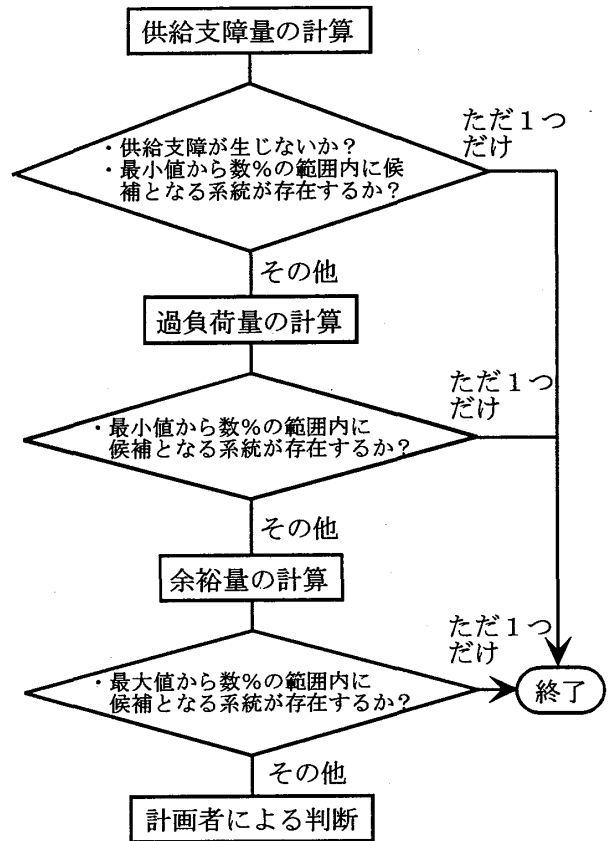


図3 供給信頼度評価手順

Fig.3 Procedure of evaluating power supply reliability.

大と最小差分位相角, $\Delta\theta_p$ と $\Delta\theta_q$ は、 $N2$ における任意の母線での差分相角である。

(3) 解法アルゴリズム

境界規範に基づいて、1回線停止の場合の線路潮流逸脱違反を検出する限定戦略による想定事故解析のアルゴリズムを示す。

- a. 事故を想定していないベースケースに対して(9)式の P_{km}^0 を求める。次に、予め設定されている線路容量に基づいて、(8)式から線路の $\Delta\theta_k - \Delta\theta_m$ を求め、値の大きい順にリストに記憶される。
- b. 各想定事故に対して、サブネットワーク $N1, N2, N3$ を適当に決定する。
- c. 補償法により事故箇所の注入電力を計算し、サセプタンス行列 B を修正する。
- d. サブネットワーク $N1$ を(9)式から求める。
- e. サブネットワーク $N3$ の最大差分位相差 $\Delta\theta^M$ を求める。
- f. サブネットワーク $N2$ 内のどの線路の差分位相差も $\Delta\theta^M$ を越えることはないので、a. で決定した

リストから $\Delta\theta^M$ より小さい差分位相差をもつ線路が過負荷を生じる可能性がある。

4. 作業配置と評価

4. 1 セキュリティ指標による評価

本研究では、停電作業の組合せを供給信頼度で評価するため、前節のセキュリティ指標を組み合わせて使用する。これは、作業要求を系統混に対応づけて指標を算出する方法では、計算結果に差が生じないことにより判定不能に陥ることを避けるとともに、3つの異なる指標を考慮することで供給信頼度を多角的に判定するためである。図3にその流れを示す。まず、計画作成時に最も重要視している供給支障量を用いて系統混の比較が行われる。このとき、指標値が最小の系統が供給信頼度が高いと判断されるが、供給支障が生じない、あるいは最小値と数%の差内に系統が複数存在したときは、過負荷量を用いて評価する。過負荷量に対しても、最小の系統構成が選択されるべきであるが、もし最小値から数%の差の範囲内に他の系統が存在すれば、最終的に余裕量にを用いて評価する。余裕量の比較では、最大値となる系統構成が選択されるが、他の指標と同様に数%の差で他に系統構成が存在する時は、最終的に計画者の判断で系統を決定する。ここで、各指標の評価において設定される数%の範囲とは、計画者が適用する系統構成に応じて定めるものとする。

4. 2 作業配置決定手順

図3 は日曜日を極力避けるような作業組合せ手順を示している。まず、予め計画期間を一定期間ごとにいくつかの期間に分割し、負荷パターンは各期間の代表的な一日を用いてその期間全体の負荷パターンを代表するものとする。また、作業組合せを行うときの仮定として、作業時系統構成の選択により系統分離および過負荷を生じる組合せは選択しないものとする。提案する停電作業組合せ手順は6つのステップからなる。

Step1: 優先順位の決定

決定された作業単位に対して、作業期間と延べ人数を基準にして優先順位を決定する。

Step2: 作業日の決定 I

優先順位の高い作業単位から順に、総需要の低い期間に日曜日を避けて作業日を指定していく。また作業期間が一週間を越えるような作業に対しても日曜日を極力 挟まないように日時を指定する。このとき作業の平準化をはかるために、考察期間 に作業単位が一様に割り当てられたならば次のステップへ進む。

Step3: 系統構成の決定 I

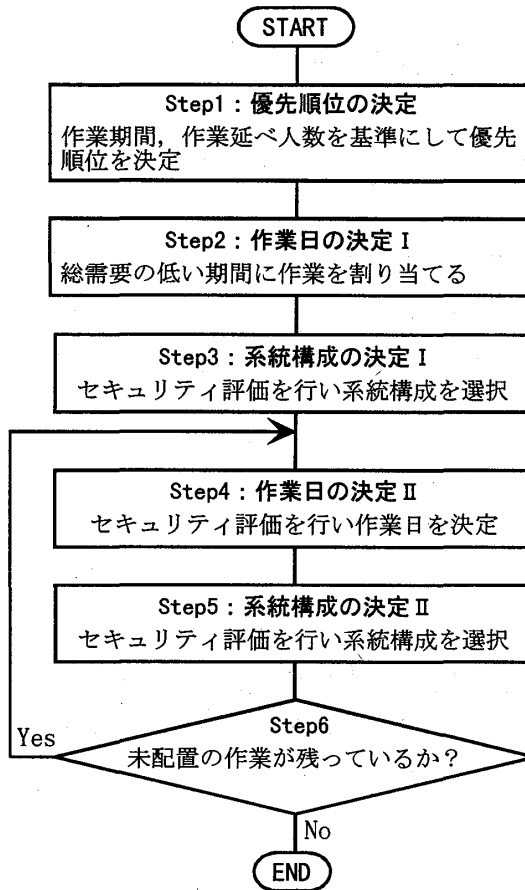


図4 作業配置決定手順
Fig.4 Procedure of allocating outage works.

あらかじめ準備された系統混の中からよりセキュリティレベルの高くなる系統構成を選択する。前のステップで作業日時指定された作業単位とそのときの負荷パターンとでできる組合せ各々に対して、あらかじめ準備された系統構成を全て当てはめて想定事故計算を行い、算出されるセキュリティ指標に基づいてセキュリティ 図4.3は日曜日を極力避けるような作業組合せ手順を示している。まず、令計 画期間を一定期間ごとにいくつかの期間に分割し、負荷パターンは各期間の代 表な一日を用いてその期間全体の負荷パターンを代 表するものとする。また、作業組 合せを行うときの仮定 として、作業、系統混の選択により系統分離および過負 荷を生じる組合せは選択しないものとする。提案する 停電作業組合せ手順は6つのス テップからなる。

Step4: 作業日の決定 II

残りの作業単位の作業日時の決定を行う。残りの作業単位の中で優先順位の高いものから順に、前のステップまでに決定している全ての作業時系統と組合せて想定事故計算を行う。そして算出されるセキュリティ指標により、一番セキュリティレベルの高くなる日時

に作業日を決定する。このとき、このステップで扱う作業間での重複を避けて作業日を指定し、考察期間に一樣に日曜日を避けながら割り当てられたら次のステップに進む。

Step5: 系統構成の決定 II

系統構成の組み替えを行う。前のステップで作業単位の組合せの変更が行われた部分に対して、ステップ3と同様にしてあらかじめ準備された系統構成の中からセキュリティ指標に基づき、よりセキュリティレベルの高くなる系統構成を選択する。

Step6: 組合せ操作終了の判定

まだ作業単位が残っていれば、ステップ4へ戻り作業日時の決定を行うが、残っていなければ終了する。

表1 例題系統の規模

Table1 The number of buses and lines for example system.

	IEEE30	IEEE57	IEEE118	235母線系統
母線数	30	57	118	235
線路数	41	78	179	358

表2 計算時間の比較

Table2 Comparison of execution times.

	IEEE30	IEEE57	IEEE118	235母線系統
限定戦略あり	0.03847	0.08936	0.26850	0.82213
限定戦略なし	0.03957	0.17164	0.75832	3.05374

(単位はすべて秒)

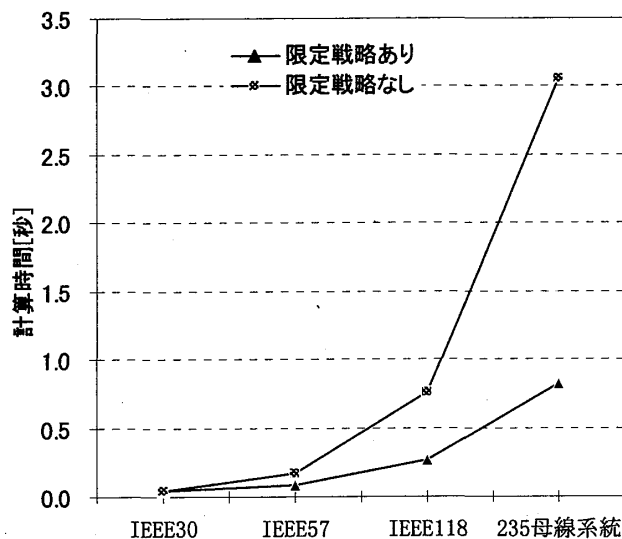


図5 計算時間のグラフ

Fig.5 Graph for table 2.

5. シミュレーション

5.1 限定戦略による想定事故計算

限定戦略法を考慮した想定事故計算の有効性を検証するため、プログラムを作成し、4つの例題系統へ適用を試みた。これら使用した例題系統の母線数及び線路数を表1に示す。シミュレーションでは、すべての線路について単一线路故障を想定し、過負荷線路を検出するのに要する計算時間を計測した。表2と図5に計測結果とそのグラフを示す。また、限定戦略におけるサブネットワークN1は、故障線路を中心に同心的に線路距離2だけ拡張した線路と母線を含む。N3はN1の中で、N2に対する境界ノードの集合である。使用した計算機はサンワークステーション Ultra2 (170MHz) である。

図5の計測結果より、すべての例題系統で限定戦略による手法が優れていることがわかる。横軸の例題系統は、母線数よりIEEE30を1とすると、概ね2, 4, 8倍となっており、限定戦略を利用していない手法では計算時間がこの母線数の2乗に比例して増加している。これに対して、限定戦略を使用した手法では、ほぼ母線数に比例して増加しており、優れていることが明らかである。

5.2 月間作業計画への適用

提案する作業組合せ手順の有効性を確認するため、文献[7]に示した作業50件に対して1ヶ月間にわたる作業計画を行う。計画期間は表3に示すように31日間を5つに分割し、各期間内で最大となる総需要時の負荷パターンを指標計算で用いた。系統構成は図6に示す中国電力網における110kV送電系統の一部である。表4は従来の作業調整者によって計画され、過去に実施された計画である。これに対し、表5は前節の日曜日の作業を排除する組合せ手順に従って作成された計画であり、作業単位は筆者らがこれまでに提案した作業集約手法で得られたものを使用した。

作業調整者から得られた計画は提案手法と比較して、

- (1) 作業集約状況が異なる
- (2) 日曜日の作業排除は行っていない

という点で単純に計画の優劣を比べることはできないが、供給信頼度の向上性という観点から検討を行う。従来法では、作業を行わない日が4日あるにもかかわらず1日あたりの最大作業人数が従来法では32人であるのに対し、ケース1では29人と減少している。加えて3つの指標に対してはいずれもケース1の方が従来法より改善されており、特に供給支障量についてその最大値を384から86に削減しただけでなく、供給支障が発生しない日も増加している。系統構成については従来法と提案法ともに2種類(便宜上、34種類の系統構成

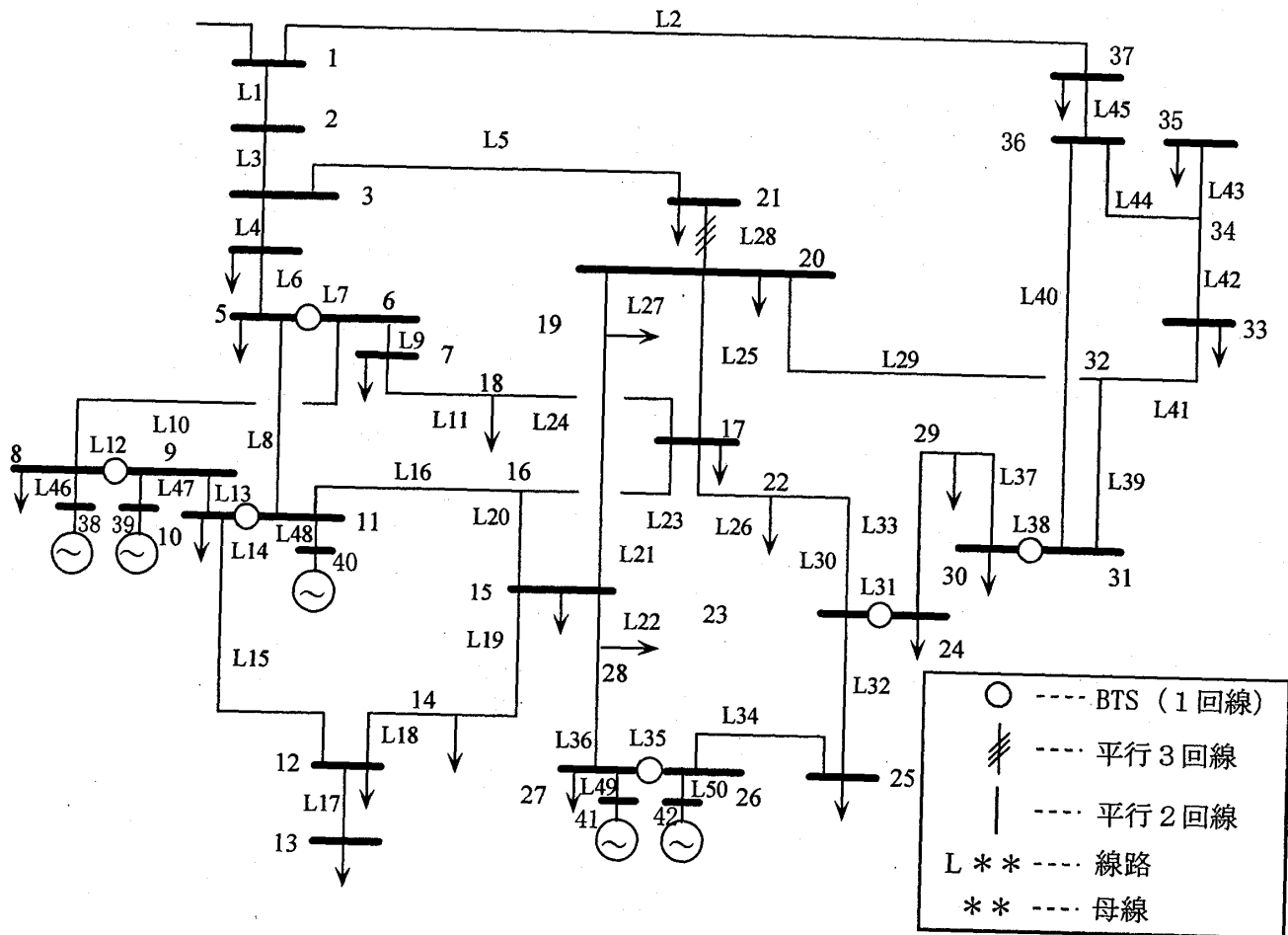


図6 適用系統
Fig.6 Applied power system .

に番号付けを行い、その中の番号8と26) が使用されている。

6. おわりに

本研究では、限定戦略手法によりセキュリティ指標を算出し、供給信頼度確保を目指した停電作業組合せ手順について述べた。まず、供給信頼度の面から停電作業と系統構成の組合せを定量的に評価するため、3つのセキュリティ指標を提案する。このセキュリティ指標は、直流法による潮流計算で算出することが可能であるが、停電作業と系統構成の組合せが莫大であるため、更に高速な手法である限定戦略法を利用したので、これについて述べた。次に、セキュリティ指標を用いた作業組合せの評価手法と計画期間内の作業量を平準化するための作業配置手順について説明を行った。最後に、プロトタイプシステムを開発し、モデル系統へ適用した結果を示した。その結果、1ヶ月間の作業計画表の比較では、作業計画者が作成した計画と比べ、提案手法は大幅な供給信頼度の向上が確認された。

参考文献

- [1] D.Elmakis and P.Levy, "Reliability Calculation under Planned Maintenance," IEEE Trans. on PWRs, Vol.PWRs-2, No.1, pp.1-7, 1987
- [2] V.Brandwajn, "Efficient Bounding Method for Linear Contingency Analysis," IEEE Trans. on PWRs, Vol.3, No.1, pp.38-43, 1988
- [3] IEEE Committee Report, "Bulk System Reliability - Measurement and Indices," IEEE Trans. on PWRs, Vol.4, No.3, pp.829-835, 1989
- [4] R.A.Schlueter, J.E.Sekerke, and A.G.Costi, "Improved Contingency Measures for Operation and Planning Applications," IEEE Trans. on PWRs, Vol.4, No.4, pp.1430-1437, 1989
- [5] 川原, 佐々木, 久保川, 朝原: 「高電力供給信頼度を考慮した電力設備停止計画支援システムの一提案」, 電気学会論文誌, Vol. 116-B, No. 12 , pp. 1492-1499, 1996

表 5 提案手法による作業調整結果

Table4 Results of outage planning by the proposed method.

作業単位	日付																																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
1	■																																
2																																	
3																																	
4								■																									
5																																	
6																																	
7																																	
8																																	
9																																	
10																																	
11																																	
12																																	
13																																	
14																																	
15																																	
16																																	
17																																	
18																																	
19																																	
20																																	
21																																	
22																																	
23																																	
24																																	
作業人数	17	17	17	17	13	14	20	0	3	14	14	19	10	8	0	11	7	5	5	14	12	0	12	9	29	18	18	11	0	17	15	5	
系統構成	8	8	8	8	8	6	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	
供給支障量[MW]	0	0	0	0	42	86	0	18	0	0	0	0	0	0	0	19	18	20	19	19	17	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	278	
動負荷量[MW×10E3]	0	0	0	0	73	3	3	0	2	1	1	3	1	4	4	4	3	3	4	1	1	3	3	3	3	0	0	1	1	3	3	2	134
余裕量[MW×10E3]	7	7	7	8	8	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	7	8	8	8	8	8	8	8	235	

- [6] 河田, 奥, 榑林, 彦坂, 瀧瀬, 野本, 田村, 澤: 「作業停電調整支援システムの開発」, 電力技術研究会資料, PE-97-173, pp. 1-6, 1997
- [7] 川原, 中山, 佐々木: 知識処理による停電作業集約支援システムの一提案, 福山大学工学部紀要, 第21巻, pp. 17-24
- [8] K.Kawahara, H.Sasaki, J.Kubokawa, H.Asahara, K.Sugiyama, "A Proposal of a Supporting Expert System for Outage Planning of Electric Power Facilities Retaining High Power Supply Reliability Part I ~ Outline of a Supporting System and Outage Work Allocation Based on Indices ~," IEEE PE-952-PWRS-0-11-1998
- [9] K.Kawahara, H.Sasaki, J.Kubokawa, H.Asahara, K.Sugiyama, "A Proposal of a Supporting Expert System for Outage Planning of Electric Power Facilities Retaining High Power Supply Reliability Part II ~ Knowledge Processing and Simulation Results ~," IEEE PE-953-PWRS-0-11-1998