最適切替潮流計算法による停電作業計画の系統構成の生成法

学生員 趙 寧虎 (広島大学)
 正 員 久保川 淳司 (広島大学)
 正 員 川原 耕治 (福山大学)
 正 員 佐々木 博司 (広島大学)

A Method of Constructing Network Configuration for
 Outage Works by Means of Optimal Switching Power Flow

Ninghu Zhao, Student Member (Hiroshima University) Junji Kubokawa, Member (Hiroshima University)
 Koji Kawahara, Member (Fukuyama University) Hiroshi Sasaki, Member (Hiroshima University)

As a power system is becoming larger and more complex, it has become more difficult for planning engineers to adjust outage works since the number of maintenance works has increased accordingly. For the purpose of assisting planning engineers the authors have developed a supporting expert system for outage work planning of electric power facilities. The proposed system is aiming to maintain high supply reliability when outage works are executed based on the combined use of three different security indices. A suitable system configuration for a particular set of outage works is chosen out of the prepared system configurations which have been formed from the past operation records. However, to obtain feasible plans from the standpoint of adequacy in system configurations, it is necessary to consider the following three issues: (a) reducing the number of switching operations, (b) transition of system configurations from day to day, and (c) complete avoidance of supply shortage at N-1 contingencies.

In this paper, we propose a novel method of making up suitable system configurations by means of optimal switching power flow in DC model. In the optimal switching power flow, pivot operations on an LP like tableau is regarded to correspond to switching operations in a power system and thus it aims to obtain the optimal system configuration by minimizing some objective function. In the proposed method, the amount of overloads in line flows is chosen as the objective function and thus a line switching is selected so that the overload reduces most. As to the consistency in transition of system configurations between the consecutive days, the tableau is augmented to include three days.

キーワード：停電作業計画，系統構成，最適切替潮流計算法

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、点検等が不可欠である。この工事や作業の施工過程で機器の停止を伴うものは停電作業と呼ばれる。停電作業を実施する際は、系統の安定運用、作業効率などを十分に考えなければならない。しかし、電力系統の拡大による停電作業件数の増加は、計画担当者による作業調整をより困難なものにしており、効果的な支援システムの必要性が高まっている。著者らは作業要求書から日時指定を排除してより柔軟な作業組合せをすることにより高い供給信頼度を実現する支援システムの開発を行ってきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。このシステムは、予め用意された系統構成の中からセキュリティ指標を利用して最適なものを選択している。しかし、より実現可能な停止計画を立案するには、(1)切替操作回数の低減、(2)日間の系統構成の連続性、(3)単一想定事故時の供給支障の発生を防ぐことを考慮した系統構成を生成する必要がある。

停電作業における系統構成の生成問題は、すべての線路の投入／開放を決定する組合せ問題であり、その解を得ることは容易でない。組合せ問題は従来分枝限定法などの数

理計画的手法が適用されてきたが、近年、ヒューリスティックなアルゴリズムの開発が盛んになっている。文献(4)ではタブサーチを用いた作業停電調整支援システムが、文献(5)では問題空間探索法を用いた系統構成の立案アルゴリズムが提案されている。しかし、これらの手法では電力設備の切替操作回数が考慮されていないうえ、系統が放射状でなければならないという制限がある。1986年Bacherらにより提案された最適切替潮流計算法(Optimal Switching Power Flow:OSPF)⁽⁶⁾⁽⁷⁾は、LP手法に似たタブローのピボット操作を切替操作に対応づけることで目的関数を最小化するものであり、準最適解を実時間で求めることができる高速アルゴリズムである。しかし、このOSPFは切替操作回数や、系統の日間連続性を考慮することができないという問題点がある。

本研究では月間停電作業計画における系統構成生成問題に対して、系統操作回数と日間の系統構成を考慮した拡張OSPF手法を提案する。提案法では日間の連続性を考慮するため、タブローを3日間に拡張し、ピボット操作は翌日あるいは翌々日まで切替の必要がない切替操作から選択す

るという制約を加えた。さらに、従来のOSPFを適用して得られる解（フェーズ1）、1日から月末の方向に拡張OSPFを適用して得られる解（フェーズ2）と月末から1日の方向に拡張OSPFを適用して得られる解（フェーズ3）の3つの解から、日間の系統構成の連続性を維持しつつ切替回数のもっとも少ない操作を決定するアルゴリズムを提案する。提案法の有効性を確認するために、42母線の実系統に対して適用し、良好な結果を得たので報告する。

2. 問題の定式化

<2.1> 目的関数 系統構成生成問題の目的は、系統の信頼性を維持しつつ、考察期間内の系統切替操作回数が少なく、系統構成の日間連続性のある系統を作成することである。系統の信頼性を維持するためには潮流限界値までの余裕を一定以上確保する必要がある。そのため、本研究では線路潮流制約よりも厳しい線路潮流目標値を設定し、偏差の最大値を最小化する。さらに、次章で述べるOSPFの拡張ピボット選択法により、切替操作回数を減らす手法を採用した。

目的関数：

$$\min f(P) = \max_i \begin{cases} \frac{P_i^j - P_i^T}{P_i^T} & 0 \leq P_i^j \\ \frac{-P_i^j - P_i^T}{P_i^T} & P_i^j < 0 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 P_i^j, P_i^T ：線路 i の j 日の潮流と潮流目標値

<2.2> 制約条件 作業時に線路に過負荷を生じさせないために以下の制約を考慮した。

$$-P_i^M \leq P_i^j \leq P_i^M \quad i=1, \dots, m \quad j=1, \dots, NM \quad (2)$$

ここで、 NM は月末の日を表す。

作業時に単一想定事故が発生したときでも供給支障が生じない構成が望ましいが、すべての単一想定事故時に線路過負荷が生じないような解を求めることは困難である。そこで、本研究では作業時に送電線一回線事故或いは変圧器1バンク事故が発生しても系統が分離しない構成となる制約を課した。

3. 提案法の概略と手順

<3.1> 概略 本論文では考察期間での系統切替操作回数をできるだけ少なくするという目的を達成するために、付録に説明するOSPFのタブローを3日間に拡張し（拡張OSPFと呼ぶ）、ピボット操作（＝切替操作）の選択を以下の二つの基準に基づいて行うこととした。

- (i) 連続数日の目的関数を同時に減らすこと
- (ii) 目的関数の減少量が大きいこと

もし、基準(i)と(ii)の間にトレードオフが生じるときは、目的関数を減少させる操作を優先する（これを拡張ピボット選択と呼ぶ）。

図1に提案法のフローチャートを示す。まず、OSPFを適用して日間の連続性を考慮しない操作集合を求める（フェーズ1）。次に、拡張OSPFを適用して日間の連続

図1 提案法のフローチャート

Fig. 1 Flowchart of the proposed method

性を前向きに考慮した1日から MN 日までの操作集合（フェーズ2）と、後ろ向きに考慮した MN 日から1日までの操作集合（フェーズ3）を求める。最後に、三つの結果から考察期間中の切替操作総回数が最小のものを基に最終決定を行う。

<3.2> 手順の説明 以下に提案法の手順を説明するが、その準備として、以下の記号を定義しておく。

$S[K]$ ：作業のために基本系統から開放される線路集合（作業集合と略す）

$T[K]$ ： K 日のタブロー

$H[K]$ ：目的関数を減少させる単一操作の集合

$G_1[K]$ ：日間の連続性を考慮しない操作集合

$G_2[K]$ ：前向きに日間の連続性を考慮した操作集合

$G_3[K]$ ：後ろ向きに日間の連続性を考慮した操作集合

$B_1[K]$ ： K 日と $K+1$ 日の目的関数を同時に減少させる単一操作の集合

$B_2[K]$: $K, K+1, K+2$ 日の目的関数を同時に減少させる単一操作の集合

$E_1[K]$: $K+1$ 日の作業集合中, K 日の目的関数を減少させる単一操作の集合

$E_2[K]$: $K+2$ 日の作業集合中, $K, K+1$ 日の目的関数を同時に減少させる単一操作の集合

ここで, 基本系統とは系統内のすべての線路が投入されている系統を, 初期系統とは基本系統からいくつかの線路を開放して構成された系統構成を, 操作集合とは初期系統に対して行う切替操作を示す。各集合の要素の数字は線路番号を指す。また, 集合 $G_1[K]$, $G_2[K]$, $G_3[K]$ において, 開放操作はプラス, 投入操作はマイナスで表す。

(1) フェーズ1 : $G_1[K]$ の生成

Step1 : 初期系統と作業集合 $S[K]$ によって初期タブロー $T[K]$ を生成する。

Step2 : $T[K]$ とOSPFの特性 b, c を用いて, 集合 $H[K]$ を生成し, 対応する目的関数の減少量を計算する。

Step3 : 集合 $H[K]$ から目的関数の減少量が一番大きい操作を $G_1[K]$ に入れ, 対応するピボット操作により $T[K]$ を修正する。

Step4 : K 日の目的関数が目標値より小さければ $K+1$ 日に移り, そうでなければStep 2に戻る。

(2) フェーズ2 : $G_2[K]$ の生成

STEP 1 : $K-1$ 日に行った操作集合のうち, K 日に切替が必要ない操作があるかを調べる。

Step1-1 : 初期系統と作業集合 $S[K]$, $S[K+1]$, $S[K+2]$ によってそれぞれの日の初期タブロー $T[K]$, $T[K+1]$, $T[K+2]$ を生成する。

Step1-2 : $K-1$ 日に行った操作 $G_2[K-1]$ より K 日の操作候補集合を生成する。

Step1-3 : 各操作候補の目的関数の減少量を計算する。

Step1-4 : 目的関数の減少量が最大の操作を $G_2[K]$ に入れ, 対応するピボット操作により $T[K]$ を修正し, K 日の操作候補集合からその操作を除く。もしすべての操作候補が目的関数の増加となる時終了する。

Step1-5 : K 日の操作候補集合が空でなければStep 3に戻り, 空なら終了する。

STEP 2 : K 日において可能な操作から $K+1$ 日または $K+2$ 日まで切替が必要ないものを選択する。

Step2-1 : $T[K]$, $T[K+1]$, $T[K+2]$ とOSPFの特性 b, c を用いて, 集合 $H[K]$, $H[K+1]$, $H[K+2]$ を生成する。

Step2-2 : 集合 $B_1[K]$, $B_2[K]$, $E_1[K]$, $E_2[K]$ をそれぞれ以下のように求める。

$$B_1[K] = H[K] \cap H[K+1] \quad \dots \quad (3)$$

$$B_2[K] = B_1[K] \cap H[K+2] \quad \dots \quad (4)$$

$$E_1[K] = H[K] \cap S[K+1] \quad \dots \quad (5)$$

$$E_2[K] = B_1[K] \cap S[K+2] \quad \dots \quad (6)$$

Step 2-3 : $E_2[K]$, $E_1[K]$, $B_2[K]$, $B_1[K]$, $H[K]$ の順に調べ, 空でない集合から一つの操作を選んで, その集合に対応する各日の操作集合 $G_2[K]$ に入れ, その日に対応するタブローと集合 H を修正する。

Step 2-4 : K 日の目的関数が目標値より小さくなければ $K+1$ 日に移り, そうでなければStep 1に戻る。

(3) フェーズ3 : $G_3[K]$ の生成

フェーズ2の「 $K-1$ 日」を「 $K+1$ 日」で (STEP1'), 「 $K+1$ 日, $K+2$ 日」を「 $K-1$ 日, $K-2$ 日」で (STEP2'), $G_2[K]$ を $G_3[K]$ で入れ替えればよい。

(4) 最終決定段

切替操作回数をさらに減少するために, いくつかのルールに基づいて最終決定を行う。以下に三つのルールを例として挙げる ($G_2[K]$ を基にし, 操作は OP_T で表す)。

ルール1 :

IF $OP_T \notin G_2[K-1]$, $OP_T \in G_2[K] \cap G_2[K+1]$
and K 日に OP_T をしなくても制約違反が生じない
THEN $G_2[K]$ から OP_T を除く。

ルール2 :

IF $OP_T \in G_2[K-1]$, $OP_T \notin G_2[K]$
and K 日に OP_T を行っても制約違反が生じない
THEN $G_2[K]$ に OP_T を入れる。

ルール3 :

IF $G_2[K-1] \cap G_2[K] \cup G_2[K] \cap G_2[K+1] \subset G_1[K]$
and $G_1[K]$ の操作回数が $G_2[K]$ のものより少ない
THEN $G_1[K]$ で $G_2[K]$ を入れ替える。

表1にフェーズ2のStep1の決定過程の一例を示す。まず, $G_2[K-1]$ から K 日の操作候補集合を生成し, 対応する目的関数の減少量を計算する。この場合, 線路12の開放操作による目的関数の改善が一番大きいので, その操作を $G_2[K]$ に入れ, 対応するピボット操作により $T[K]$ を修正し, その操作を K 日の操作候補集合から除く。次に, 残った二つの操作候補は共に目的関数を増加させるのでこの段階の決定を終了する。

フェーズ2のStep2では, 以下のことに注意する必要がある。作業による操作は必ず実行しなければならないが, その操作の開始日を早めても全体の切替操作回数は増加しない場合がありうる。そのため, Step 2-3でその操作開始日を早めに行うことができるかどうかを調べ, もし可能であれば操作を早めることで全体の操作回数の減少を計る。表2はフェーズ2のStep2で $E_2[K]$ が空でない場合, すなわち作業による操作の開始日を早めに行うことができる例である。まず, 各日の集合 H とそれに対応する目的関数の減少量を求める。集合 $H[K]$, $H[K+1]$ と $S[K+2]$ とともに線路32の開放操作を含んでいるので, この操作を $E_2[K]$ に入れる。次に, その操作を $G_2[K]$, $G_2[K+1]$ に入れ, 対応するピボット操作により $T[K]$, $T[K+1]$ を修正し, 新しい集合 $H[K]$, $H[K+1]$ を求める。

表1 フェーズ2の手順1の一例
Table 1 An example of process 1 in phase 2

$G_2[K-1]=[12,-19,-56]$			
サイクル	K日の候補		K日の操作 $G_2[K]$
	操作	減少量	
1	12	0.5	12
	-19	0.2	
	-56	増加	
2	-19	増加	
	-56	増加	

(注) 表中の12は線路12の開放を表し、-19は線路19の投入を表す。

表2 フェーズ2の手順2の一例
Table 2 An example of process 2 in phase 2

$S[K]=[25]$		$S[K+1]=[24]$		$S[K+2]=[32, 34]$	
$H[K]$		$H[K+1]$		$H[K+2]$	
操作	減少量	操作	減少量	操作	減少量
13	0.5	10	0.4	13	0.5
32	0.3	32	0.2	33	0.2
44	0.4	44	0.1	38	0.4
$E_2[K]=[32]$		$G_2[K]=[12] \rightarrow [12, 32]$		$G_2[K+1]=[] \rightarrow [32]$	

4. シミュレーション

本研究では図2の42母線実系統を基本系統としてシミュレーションを行った。初期系統は通常の運用において頻繁に使用される、比較的強いと思われる系統構成、すなわち基本系統から線路17, 18, 19, 23, 54, 55, 58, 65が開放された系統構成を選択した。提案法の有効性を確認するため、線路潮流の制約値を通常の1/2~1/3に厳しくした。各日の負荷パターンと発電機パターンはそれぞれの総需要と出力の最大値を使用した。

作業配置は過去一ヶ月に実際に実施された50件の作業に対する10ケースの配置案を基にした。ケース1~3は当研究室で開発された「作業計画調整支援システム」⁽¹⁾を用いて供給支障量、過負荷量、余裕量指標をそれぞれ優先して得られた配置であり、ケース4~10は一樣乱数で作業開始日をランダムに配置したものである。本シミュレーションでは、目的関数の目標値を線路潮流の最大値が制約の95%以下になることとした。

表3は各作業配置案における系統構成を構築する切替操作の考察期間中の総回数と操作された線路の最大操作回数を示す。この表から分かるように、提案法の前向き法と後向き法の切替操作総回数はいずれも日間の連続性を考慮し

なかったものよりよく、最終決定はすべてのケースで最小の切替操作となった。提案法の同一の開閉器の最大操作回数も減少している。

表4にケース1の作業配置案に対して得られた切替操作を示す。多重回線は線路番号にそれぞれa, b, cなどを加えて区別した。後ろ向き法の考察期間中の切替操作総回数(合計)が最小であるので、最終決定は後ろ向き法の結果を基にルールを適用した。29日から31日までルール2を繰り返して適用した結果、切替操作総回数をさらに1回減らすことができた。

表5はケース1の作業配置案に対して、文献(1)の手法で得た系統構成と提案法で得た系統構成の各日の単一想定事故時に生じる過負荷の最大値を示す。ここで従来法で得た系統構成の切替操作総回数は29回で、提案法の19回より多いことに注意する必要がある。表から分かるように、本提案法は切替操作総回数を減少すると同時に、単一想定事故時の過負荷量も減少していることがわかる。これは提案法の目的関数は線路潮流の相対値のミニマックスであるため、通常時の線路潮流の大きさが押えられ、均一化されるからであると考えられる。

図2: 42母線実系統図

Fig. 2: 42-bus system

表 3 切替操作総回数と操作線路の最大操作回数

Table 3 Sum of number of switchin operation maximum of the number of switchin operation of opratede lines

ケース	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
考慮なし	44/10	40/11	38/11	52/15	40/10	32/9	48/11	34/9	32/9	36/13
前向き法	21/6	23/6	23/7	27/6	22/5	22/7	23/5	20/5	17/4	15/5
後向き法	20/6	20/4	18/5	24/6	26/4	16/7	30/6	27/5	18/4	12/3
最終決定	19/6	17/3	17/5	23/6	22/5	15/7	23/5	18/4	15/4	11/3

注：切替操作総回数／操作線路の最大操作回数

表 4：ケース 1 の各日に行う切替操作

Table 4 Switching opration at every day in Case 1

日付	考慮なし	前向き法	後向き法	最終決定	日付	考慮なし	前向き法	後向き法	最終決定
1	-29b	-31	-31	-31	17	-12,-29a	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31
2	-29b	-31	-31	-31	18	-12,-29a	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31
3	-29a	-31	-31	-31	19	-12,-29a	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31
4	-29a	-31	-31	-31	20	-12	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31
5	-29b	-31	-31	-31	21	-11b,-29a,-31	-11b,-29a,-31	-11b,-29a,-31	-11b,-29a,-31
6	8a,-12,-31	8a,-12,-31	8a,-12,-31	8a,-12,-31	22	-12,-29a	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31
7	-12,-31,38	-12,-31,38	-12,-31,38	-12,-31,38	23	-12,-29a	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31
8	-12,-29a	-12,-31,38	-12,-31	-12,-31	24	-12,-29a	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31
9	-12,-29b	-12,-31,38	-12,-31	-12,-31	25	-12,-29a	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31
10	8a,-11a,-12	8a,-11a,-12	8a,-11a,-12	8a,-11a,-12	26	-31	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31
11	-12,-29b	-12,-29b	-12,-29a	-12,-29a	27		-12,-29a,-31	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31
12	-12,-29a	-12,-29b	-12,-29a	-12,-29a	28	-29a,-31	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31
13	8a,-12,-29a	8a,-12,-31	8a,-12,-29a	8a,-12,-29a	29	-12,-29a	-12,-29a,-31	-12,-29a	-12,-29a,-31
14	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31	30	-12,-29a	-12,-29a,-31	-12,-29a	-12,-29a,-31
15	-12,-29a	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31	31	-12,-29a	-12,-29a,-31	-12,-29a	-12,-29a,-31
16	-12,-29a	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31	-12,-29a,-31	合計	44	21	20	19

5. あとがき

本稿では停電作業計画における系統構成に関する問題点を検討し、その問題点を解決する方策を提案した。実系統に対してシミュレーションを行った結果、提案法の有効性が確認できた。

今後の課題として、三つの結果からの最終決定をより知的に行うことと、N-1セキュリティを制約条件として厳密に組み入れることが考えられる。

(平成9年9月24日受付，同10年1月13日再受付)

文 献

(1) 川原，他：「停電作業組合せ決定における一考察」平成5年度電力技術研究会，PE-93-137
(2) 川原，他：「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」，電学論B，100，pp.1492-1499（平8-12）
(3) K.Kawahara,etc.:"Development of a Supporting Expert System for Outage Planning of Electric Power Facilities", ESAP Proceedings, 1993,pp.39-44
(4) 吉川，他：「タブサーチを用いた作業停電調整支援システムの開発」，平成8年度電力技術・電力系統技術合同研究会，PE-96-90,PSE-96-90
(5) 伊東，他：「作業停電調整アルゴリズムの開発」，平成8年電気学会全国大会，No. 1297
(6) R.Bacher,H.Glavitsch:"Network Topology Optimization with Security Constraints", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, No. 4, pp.103-111, Nov. 1986

表 5 ケース 1 の各日の最大 N-1 過負荷量（単位：MW）

Table 5 The maximum of overload of single contingencies at everyday in case 1 (Unit : MW)

日付	従来法	提案法	日付	従来法	提案法
1	101	70	17	81	70
2	105	70	18	83	70
3	105	70	19	81	70
4	107	70	20	78	58
5	115	70	21	157	70
6	62	61	22	88	70
7	125	79	23	101	70
8	85	70	24	100	70
9	78	70	25	101	70
10	56	56	26	93	70
11	73	70	27	101	48
12	83	70	28	90	70
13	58	55	29	85	70
14	121	70	30	87	70
15	85	70	31	89	70
16	83	70			

(7) R.Bacher,H.Glavitsch:"Loss Reduction by Network Switching", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, pp.447-453, May 1988
(8) 佐々木，他：「最適切替潮流計算法の P- δ システムへの適用」，平成5年電気学会全国大会，No. 1168

付録 最適切替潮流計算法の概要と特性

基本系統を直流モデルで表すと、その分配係数行列 D_L は式(A.1)により計算することができる⁽⁸⁾。

$$D_L = Y_d C' Z_0 C \quad \dots \dots \dots (A.1)$$

ここに、 Y_d : (m×m)線路アドミタンス対角行列、 Z_0 : (n×n)母線インピーダンス行列、 C : (n×m)インシデンス行列、 m : 系統の線路総数、 n : 系統の母線総数

基本系統から何本かの線路を開放したものを系統Aとする。 S_{off} を基本系統から開放された線路集合、 S_{on} を開放されず系統Aを構成する線路集合とすると、系統Aの線路潮流は次式で求めることができる。

$$P_{off} = [I - D_{Loff}]^{-1} P_{off}^0 \quad \dots \dots \dots (A.2)$$

$$P_{on} = P_{on}^0 + D_{Lon} P_{off} \quad \dots \dots \dots (A.3)$$

ここに、 P_{off}^0 : S_{off} に属する線路の基本系統での潮流値ベクトル、 P_{on}^0 : S_{on} に属する線路の基本系統での潮流値ベクトル、 P_{on} : S_{on} に属する線路の系統Aでの潮流値ベクトル、 D_{Loff} 、 D_{Lon} : 分配係数行列の部分行列

式(A.4)のように相補変数を定義すれば図A.1のようなタブローを作成してピボット操作により系統Aの線路潮流を求めることができる。

$$\left. \begin{array}{l} x_i = 0 < - > y_i \neq 0 \\ x_i \neq 0 < - > y_i = 0 \end{array} \right\} (i=1, \dots, m) \quad \dots \dots \dots (A.4)$$

ここで、 x_i : 開放された線路の潮流 (= P_{off})、 y_i : 開放されていない線路の潮流 (= P_{on})

線路 s の潮流を目的関数にする時、基本系統に対するタブローの各要素と基底変数は式(A.5)～(A.10)となる。

$$\left. \begin{array}{l} a_{ij} = -D_{Lij} \quad j \neq i \\ a_{ii} = 1 - D_{Lii} \quad j = i \end{array} \right\} i, j = 1, \dots, m \quad \dots \dots \dots (A.5)$$

$$\left. \begin{array}{l} c_l = -a_{sl} \quad l = 1, \dots, m, l \neq s \\ c_l = 1 - a_{sl} \quad l = s \end{array} \right\} \quad \dots \dots \dots (A.6)$$

$$\left. \begin{array}{l} b_{ij} = 0 \quad j \neq i \\ b_{ii} = 1 \quad j = i \end{array} \right\} i, j = 1, \dots, m \quad \dots \dots \dots (A.7)$$

$$d_l = 0 \quad l = 1, \dots, m \quad \dots \dots \dots (A.8)$$

$$P_i = P_{onl}^0 \quad l = 1, \dots, m \quad \dots \dots \dots (A.9)$$

$$x_i^* = y_i \quad l = 1, \dots, m \quad \dots \dots \dots (A.10)$$

OSPFは以下の特性を持つ。

特性a : ピボット操作は系統の切替操作に相当する。即ち、変数 x_i が基底に入れば線路 i の開放を意味し、変数 y_i が基底に入れば線路 i の投入を意味する。また、右辺の $P_1 \sim P_m$ は線路潮流を表す。

特性b : 線路潮流を目的関数にする時、目的関数を減らすピボット操作は式(A.11)または(A.12)を満たす。

線路 i を開放する時、

$$\text{目的関数} \times c_i \times a_{ii} \times P_i < 0 \quad \dots \dots \dots (A.11)$$

線路 i を投入する時、

$$\text{目的関数} \times d_i \times b_{ii} \times P_i < 0 \quad \dots \dots \dots (A.12)$$

基底	x_1	$\dots \dots \dots$	x_m	y_1	$\dots \dots \dots$	y_m	右辺
x_1^*	a_{11}	$\dots \dots \dots$	a_{1m}	b_{11}	$\dots \dots \dots$	b_{1m}	P_1
$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$
x_m^*	a_{m1}	$\dots \dots \dots$	a_{mm}	b_{m1}	$\dots \dots \dots$	b_{mm}	P_m
$-z$	c_1	$\dots \dots \dots$	c_m	d_1	$\dots \dots \dots$	d_m	$-z'$

図 A. 1 タブロー図

Fig. A.1 Simplex tableau

特性c : もし要素 a_{ii} がゼロであれば、それに対応している線路 i を開放する時、系統分離が生じる。

趙 寧虎 (学生員) 1961年1月10日生。1996年4月広島大学大学院工学研究科博士課程後期(システム工学専攻)に入学、現在に至る。主として、電力系統におけるエキスパートシステムの適用に関する研究に従事。

久保川 淳司 (正員) 1965年1月11日生。1987年3月広島大学大学院工学研究科博士課程前期(システム工学専攻)終了。同年4月同博士課程後期に進学。同年7月広島大学助手、1996年11月同講師、現在に至る。1993年10月から1995年4月までロンドン大学Imperial College客員研究員。IEEE会員。

川原 耕治 (正員) 1965年7月20日生まれ。昭和63年3月三重大学工学部電気工学科卒業。平成2年広島大学大学院工学研究科博士課程前期(システム工学専攻)終了。同年4月福山大学工学部電子・電気工学科助手、現在に至る。主として、電力系統におけるエキスパートシステムの適用に関する研究に従事。情報処理学会、人工知能学会、IEEE各会員。

佐々木 博司 (正員) 1941年3月10日生。1968年3月早稲田大学大学院理工学研究科博士課程(電気工学専攻)終了。同年4月広島大学工学部電気工学科講師、1980年10月第二類(電気系)助教授、1989年11月同教授(電力工学教育科目担当)、現在に至る。工学博士。主として、電力系統の過渡安定度、状態推定、最適潮流計算法、エキスパートシステムやニューラルネットワーク等の人工知能の応用に関する研究に従事。IEEE、CIGRE、日本太陽得エネルギー学会、情報処理学会、エネルギー・資源学会会員。