

①

大規模配電システムの最適スイッチ・オペレーションに関する研究

平成 元年 5月

栗原兵二郎

近年の経済安定成長および高度情報化という社会情勢の中で、電力に対する依存度はますます高くなり、生活文化の多様化および高度化と相俟って、電力の質的向上に対する要請が強くなっている。すなわち、電力の利用形態が従来の光・熱・動力から各種情報機器のコントロール源へと変化してきつつある。このような状況の中で、電力システムの末端に位置して需要家と密着している配電システムの改善が注目されるようになった。配電システムは広域で過密な市街地に小規模ではあるが膨大な数の設備が緊密に連係して設置されているという特徴がある。これらの設備は一般に戸外にあるので、天候の影響および災害を受け易いため、定期的な保守・修理が必要である。このような保守・修理のための作業停電でさえも需要家に少なからぬ犠牲を強いている。更に、事故停電による社会的影響は、今日の電力高依存社会においては計り知れないほど大きい。このため、配電システムの自動化による信頼度向上の構想は従来からあり、その時代、時代の構想に応じて、配電線の自動化、時限順送装置そして配電線スイッチの遠隔制御装置などが開発されてきた。ところで、近年、電力への諸要請と、計算機技術・情報伝送技術等の発展が相俟って、俄かに配電自動化の動きが活発化し、ハードウェア面において、配電自動化計算機システム、配電線遠隔監視制御システムなどが報告されている。他方において、このような配電自動化のためのハードウェアの進歩と比較して、配電自動化システムに適用可能なソフトウェアの開発は十分であるとは言いがたい。そのため、そのシステムの実際の運用は未だに配電技術者の経験に頼るところが大である。

このような背景の中で、本論文では、配電システムの区間スイッチ操作が自動化されつつあることに着目し、大規模配電自動化システムの実運用面に適用可能なスイッチ・オペレーションに関する2, 3のアルゴリズムを提案している。更に、これらのアルゴリズムをソフトウェアとして具体化して、大規模システムに適用することにより妥当性および実用性を検証している。

本論文の特徴は、配電システムにおけるスイッチ・オペレーションの問題をモデル化し、数理計画問題として定式化し、そして、高速な近似解法アルゴリズムに基づくソフトウェアを作成して、実用的な計算時間内で解くことにある。

なお、本論文においては、システム内では位相角の差異はないものとする。

以下、各章毎にその概要について記す。

第1章では、まず、都市部の配電システムの特徴、近年の社会情勢および配電に関する最近の技術進歩から配電自動化の必要性が生じてきていることを述べる。そ

して、配電システムのスイッチ・オペレーションについて概観して、本論文の位置づけを明らかにする。

第2章では、配電システムを計算機上で表現するために、配電システムをグラフ的に考察する。まず、配電システムとグラフ用語との対応づけを行う。そして、配電システムはグラフ的には変圧器またはフィーダ引出口を根、開放スイッチを葉、そして配電線を枝とする根付き木からなる森として表現でき、区間スイッチの開閉操作は木を拡大あるいは縮小することに相当することを述べる。

第3章では、変圧器およびフィーダの負荷分担均等化の計算方法を提案している。配電システムの円滑な運用上、事故に備えて各変圧器およびフィーダの負荷分担を均等化しておくことが重要である。まず、二変圧器間の負荷分担均等化を行うためのネットワークを作り、この二変圧器間の負荷切替問題をネットワークフロー問題として定式化する。そして、この問題が一種の部分和问题になっていることに着目して、部分和问题の近似解法アルゴリズムを応用してこの問題を解く、“基本的な計算方法”を提案している。そこで、多数の変圧器の組合せを避けるために、最も負荷分担が不均等な二つずつの変圧器を選択して、これらの変圧器に基本的な計算方法を繰返し適用して各変圧器の負荷分担を均等化する。その後で、各変圧器に接続するフィーダに対して、同様の方法で、負荷分担を均等化している。更に、この考え方は作業停電のシステムにも応用できることを示している。

第4章では、簡単のため、変圧器およびフィーダに十分余裕があるものと仮定して、グラフに基づく区間負荷測定の基本計算方法を提案している。まず、区間負荷測定においては、フィーダ間の供給区域を分離している開放スイッチ（葉）が中心的な役割を果たすことを述べる。その上で、任意区間の負荷測定と変圧器の供給区域内のすべての区間負荷測定との二通りに分けて、区間負荷測定アルゴリズムを提案している。最初に、任意区間の負荷測定は、グラフでは枝上の指定された位置からの葉の探索に帰着されることを示す。次に、変圧器の供給区域は各フィーダ引出口を根とする根付き木よりなる森で表されることに着目し、変圧器の供給区域内のすべての区間負荷は、根付き木を順次縮小することにより、組織的に測定できることを示す。

第5章では、第4章で提案された区間負荷測定の基本計算方法の実用性を一層明らかにするため、電圧降下および容量制約を考慮した区間負荷測定方法を提案している。すなわち、区間負荷の測定途中において、その時点で大まかに予測され

ている区間負荷を用いて計算された電圧降下および電流容量に制約違反が発生するような場合には、他フィーダからの融通によってその制約違反を事前に解消しながら負荷測定を行い、正確な区間負荷を得る方法である。すなわち、区間負荷の測定途中において、制約違反が発生するようなスイッチ操作が行われるようならば、事前に制約違反の解消に最も効率的なフィーダから融通する。このようなフィーダの選択問題は、本質的には複雑な組合せ最適化問題になっているので、有効勾配法の概念を用いた近似解法によって実用的な演算時間内で解を得ている。

第6章では、区間負荷が測定されているという条件の下で、電流容量制約を付した、組織的で実用的な事故時負荷切替方法を提案している。この方法の特徴は、(i)変電所間の物理的な距離または配電システムの特性などから、あらかじめ応援変圧器を指定できる、(ii)アルゴリズムが簡潔で段階的に構成されている、などである。まず、負荷切替問題は、応援側変圧器をソース、停電となっている健全区間をシンクとするネットワークのネットワークフロー問題として定式化できることを示す。次に、この問題において負荷切替量を最大化するために、部分和問題の近似解法などにより、段階的に近似解を得る負荷切替アルゴリズムを提案している。この負荷切替アルゴリズムを順次指定された応援側変圧器をソースとして、全停電区間が復旧されるまで繰返し適用する。もし、負荷切替途中において変圧器またはフィーダの電流容量に制約違反が発生するようならば、この負荷切替アルゴリズムを再帰的に適用することにより、制約違反を事前に解消している。

第7章では、区間負荷が測定されているという条件の下で、電圧降下および容量制約を考慮した組織的で実用的な事故時負荷切替方法を提案している。ここで提案している負荷切替方法においては、次のような特長がある。すなわち、(i)応援フィーダの優先順位を考慮できる、(ii)停電負荷が小さい時には高速に解が得られる、(iii)制約違反解消に効果があるスイッチ操作だけが実施される、(iv)従って、運転員になじみのある負荷切替手順が得られる、などである。まず、事故区間を除いた全停電区間を、一旦制約を考慮せずに、すべて復旧する。この操作も含め、最終解が得られるまで以下の解は計算機上の操作であることに注意しよう。もし、ここで制約違反が発生しなければ、そこで負荷切替を完了できる。次に、制約違反が発生する場合には、応援フィーダ側に制約違反が発生しない範囲で、制約違反の解消に効果が大きい負荷から順に応援フィーダ側に切替える（融通）手順を、制約違反がなくなるまで多段階的に繰返す。この融通の結果においても制約違反が残る場合には負荷遮断を行う。その場合には、スイッチの開放位置の微調整を行って遮断負荷の再復旧を試みている。

第8章は、以上の総括であり、各章毎に得られた結果を要約している。

目次	
第1章 序論	1
1.1 配電システムの種類	1
1.2 配電システムの運用状態	2
1.3 配電員による故障修理の過程	3
1.4 配電システムのスイッチ・オペレーション	5
1.4.1 平常時	5
1.4.2 異常時	5
1.5 スイッチ・オペレーションの削減技術	7
1.6 本論文の位置づけ	8
第2章 配電システムのグラフ的表現	12
2.1 常時開放形ループ配電システム	12
2.2 配電システム入のグラフ表現	14
2.3 故障スイッチの開放位置変更規則	16
2.4 開放形配電システムの例	17
第3章 変圧器およびブレイクの負荷分担の特性	19
3.1 導線	19
3.2 閉路の形成	20
3.2.1 閉路の形成	20
3.2.2 閉路の形成	20
3.3 閉路の解消	22
3.3.1 閉路の解消	22
3.3.2 閉路の定式化	22
3.3.3 逐次解法	23
3.4 負荷分担均等化アルゴリズム	24
3.5 応用例と考察	27
3.6 参考文献	29
3.6.1 負荷分担均等化の意義	29

目 次

まえがき

第1章 序論	1
1.1 配電システムの特徴	1
1.2 配電システムの運用状態	2
1.3 配電自動化の必要性和意義	3
1.4 配電システムのスイッチ・オペレーション	5
1.4.1 平常時	5
1.4.2 異常時	6
1.5 スイッチ・オペレーションの研究動向	7
1.6 本論文の位置づけ	8
第2章 配電システムのグラフ的考察	12
2.1 常時開放形ループ配電システム	12
2.2 配電システムのグラフ表現	14
2.3 区間スイッチの開放位置変更規則	16
2.4 実規模配電システムの例	17
第3章 変圧器およびフィーダの負荷分担均等化	19
3.1 概要	19
3.2 問題の記述	20
3.2.1 記号の定義	20
3.2.2 問題の説明	20
3.3 問題の解法	22
3.3.1 解法の概要	22
3.3.2 問題の定式化	22
3.3.3 近似解法	23
3.4 負荷分担均等化アルゴリズム	24
3.5 数値例と考察	27
3.6 作業停電	29
3.6.1 負荷分担均等化の意義	29

3.6.2	負荷分担均等化の考え方	29
3.6.3	負荷分担均等化のアルゴリズム	31
3.7	実規模システムの数值例と考察	32
3.8	まとめ	33
第4章	制約がない場合の区間負荷測定	34
4.1	概要	34
4.2	区間負荷測定の考え方	35
4.2.1	区間負荷測定概念	35
4.2.2	区間スイッチの開放位置変更	37
4.2.3	スイッチタイプの変更	37
4.2.4	はしご状ループ	40
4.2.5	測定不能な区間負荷	40
4.3	区間負荷測定のアルゴリズム	41
4.3.1	任意区間の負荷測定	41
4.3.2	供給区域全体の区間負荷測定	43
4.4	適用例と考察	45
4.5	まとめ	48
第5章	制約がある場合の区間負荷測定	49
5.1	概要	49
5.2	問題の説明	50
5.2.1	基本的な区間負荷測定	50
5.2.2	ループ内の区間負荷測定	51
5.2.3	分岐点区間の負荷測定	51
5.2.4	一フィーダ全区間の負荷測定	51
5.2.5	問題の要約	51
5.3	制約の監視点と制約違反量の評価	52
5.4	問題の解法アルゴリズム	54
5.4.1	供給区域全体の区間負荷測定	54
5.4.2	任意区間の負荷測定	60
5.5	適用例と考察	64
5.5.1	モデルシステム	64
5.5.2	実規模システム	66
5.6	まとめ	67

第6章 容量制約を考慮した事故時負荷切替	68
6.1 概要	68
6.2 問題の説明	69
6.3 問題の定式化	71
6.3.1 ネットワーク表現	71
6.3.2 定式化の範囲	72
6.3.3 制約条件	72
6.3.4 目的関数	73
6.4 負荷切替アルゴリズム	74
6.4.1 基本的なアルゴリズム	74
6.4.2 区間負荷の置換を含むアルゴリズム	75
6.5 ループスイッチの開放位置変更	77
6.5.1 ループスイッチ開放位置変更の意義	77
6.5.2 ループスイッチに関するアルゴリズム	78
6.6 総合的な負荷切替アルゴリズム	82
6.7 数値例と考察	83
6.8 まとめ	85
第7章 電圧降下および容量制約を考慮した事故時負荷切替	86
7.1 概要	86
7.2 問題の記述	88
7.3 問題の解法	88
7.3.1 解法の概要	88
7.3.2 制約違反を考慮しない全停電の復旧	90
7.3.3 隣接フィーダからの融通による制約違反の解消	92
7.3.4 負荷遮断	95
7.3.5 開放スイッチの開放位置微調整による負荷の復旧	95
7.4 数値例と考察	97
7.4.1 モデルシステム	97
7.4.2 実規模システム	100
7.5 まとめ	101

第8章 結論	102
謝辞	105
参考文献	106
研究業績リスト	113
付録	
付録. 1 有効勾配法	115
付録. 2 ソースの選択方法	118
付録. 3 アルゴリズムBLTAにおける別解法	121
付録. 4 アルゴリズムLOOPにおける他のカットスイッチ 選択基準	122
付録. 5 事故時負荷切替問題の一般的な定式化	123
参考論文	

第 1 章

序 論

第1章 序論

1.1 配電システムの特徴

経営システムという観点から電力事業を概観すると、発電所（工場）で生産された電力（商品）を送電システム（卸売）そして配電システム（小売）を介して需要家（消費者）の戸口まで送り届ける、というアナロジーを見出せる（図1.1参照）。このように、都市部の配電システムは電力システム（流通経路）の末端で多数の需要家と密着しており、次のような特徴をもっている。

- (1) 広域で過密な市街地の中で面的および空間的に、小規模ではあるが膨大な数の設備が緊密に連係して設置されている。
- (2) 事故が発生した時に故障地点の検出・除去を容易にするため、配電線上に設置された多数の区間スイッチを適当に常時開放して樹枝状システムを構成して運用されている。
- (3) 膨大な数の設備が、一般に戸外にあるため、天候の影響および災害を受け易い。そのため、それらの設備の定期的な保守・修理が必要であり、設備の新設、撤去、変更などの作業が繁雑に実施される。

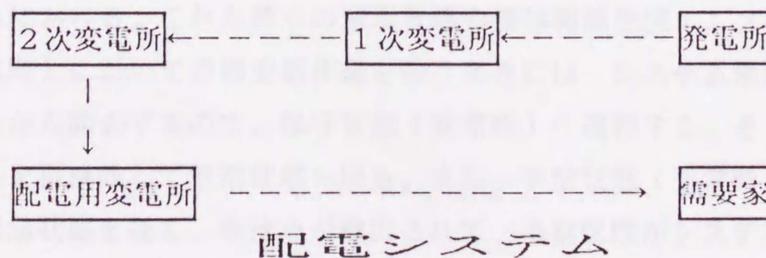


図1.1 配電システムの位置づけ

1. 2 配電システムの運用状態

電力は、他の多くの商品とは異なり、昼夜を問わず安定的に供給することが義務づけられている。ところが、需要（負荷）の日間変動あるいは季節的変動、突発的な事故、および設備更新作業などのために、配電システムの運用状況は時々刻々変化している。この配電システムの運用状況は、すべての供給区域が供給されているか、あるいは、何らかの理由により、供給支障区域が存在するかに従って、それぞれ、平常時および異常時に分類して考えることができる。すなわち、平常時においてシステムは平常状態で運用されている。他方において、異常時は、供給支障の理由に従って、保守状態、緊急状態および復旧状態に分類し得る。これら四つの状態を以下のように定義しよう。

(i) 平常状態(Normal State)

すべての供給区域が計画通りに供給されている状態。

(ii) 保守状態(Maintenance State)

システムの一部で設備更新または事故区間の修復などの作業が行われている状態。

(iii) 緊急状態(Emergency State)

事故発生直後に一部地域で停電している状態。

(iv) 復旧状態(Restoration State)

事故区間が検出・除去されたため、事故によって停電となっていた健全区間が事故区間を迂回するルートから供給されている状態。

ところで、膨大な数の設備を擁する実規模配電システムを円滑に運用するために、設備更新のための保守作業は、現実には、日常的に行われている。そのため、作業区域を計画的に停電させる作業停電を異常時に分類することには異論があるかもしれない。しかしながら、一時的にせよ、供給支障の地域があることは少なくとも平常ではないので、本論文では、作業停電の状態も異常時に分類するものとする。

配電システムにおける、これら四つの運用状態の遷移関係を図1. 2に示す。例えば、平常状態（平常時）において設備更新作業を行う場合には、システム構成を変更して作業区間をシステムから除去するので、保守状態（異常時）へ遷移する。そして、作業が終了すればシステムを再構成して平常状態へ戻る。また、平常状態（平常時）において事故が発生すると、緊急状態を経て、事故点を検出されて、事故区間がシステムから除去される。その結果、事故区間を経由して供給されていた健全区間が供給支障区域となる。そこで、この健全区間を、事故区間を迂回するルートから充電する状態、すなわち、復旧状態とな

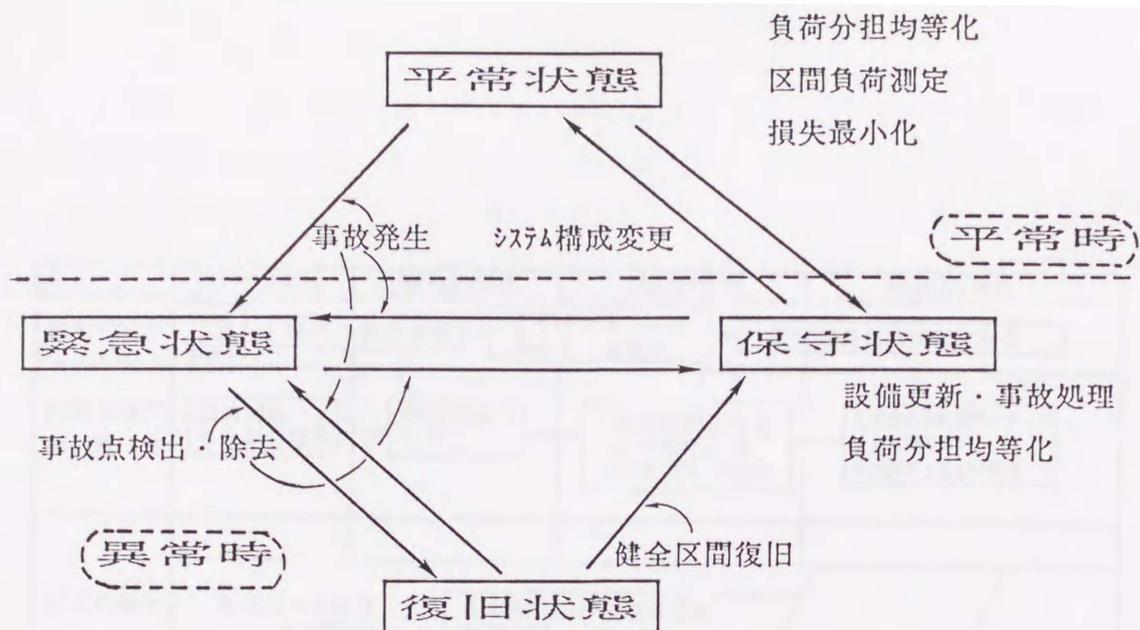


図1. 2 運用状態の遷移関係

る。次に、この健全区間が充電されたならば、システムから除去されている事故区間の修復作業を行う保守状態へ遷移する。最後に、この修復作業が完了したならば、事故前のシステムに再構成して平常状態へ戻る。

1. 3 配電自動化の必要性と意義

配電自動化の構想は従来からあり、その時代の社会的背景および技術的水準に応じて試みられてきた。その歴史を、社会的背景、配電設備の推移および配電自動化機器の推移という側面から要約すると、図1. 3のようになる⁽¹⁾。すなわち、昭和30年代の高度経済成長の時代には、大量の電力需要に応えるために、供給力を確保することを目標として多くの設備増設が行われ、さらに、時限順送装置の開発などが行われた。そして、昭和40年代後半のオイルショックを経て、昭和50年代後半以降の経済安定成長の時代になると、電力の供給力の確保に加えて、供給信頼度の向上、環境調和および安全確保などが配電設備に要求されるようになった。

以上のような過程を経て、近年の経済安定成長および高度情報化という社会情勢の中で、電力に対する依存度はますます高くなり、生活文化の多様化および高度化と相俟って、電力の質的向上の要請が強くなっている。すなわち、電力の利用形態が従来の光・熱・動力から各種情報機器のコントロール源へと変化してきつつある。このような要請に応えるためには、電力会社としては、事故時の停電時間・範囲の極小化、配電システムの効率的運用などの目的を達成するために配電自動化の必要に迫られている。このような状況の中で、近年の計算機技術、情報伝送技術および配電システム制御の目覚ましい発展に支えられて、俄かに配電自動化の動きが活発化してきた(図1. 4参照)。現在、配電自動化計算機シ

	昭和30年代	昭和40年代	昭和50年代	昭和60年代
社会的背景	戦後復興 → 経済の高度成長	オイルショックと省エネ・省資源	安定成長高度情報化社会	
配電設備の推移	設備増強による供給力確保	供給設備の近代化	・供給信頼度向上と効率化追求 ・公衆災害の防止	配電線の供給密度のアップ 供給信頼度の向上 環境調和と安全の確保
配電自動化機器の推移	配電線の自動化(ローカル制御) 時限順送装置	配電線開閉器の遠隔監視制御装置	制御用計算機による本格的配電線監視制御システム	配電総合自動化
		自動検計・負荷集中制御		

図1.3 配電自動化の推移

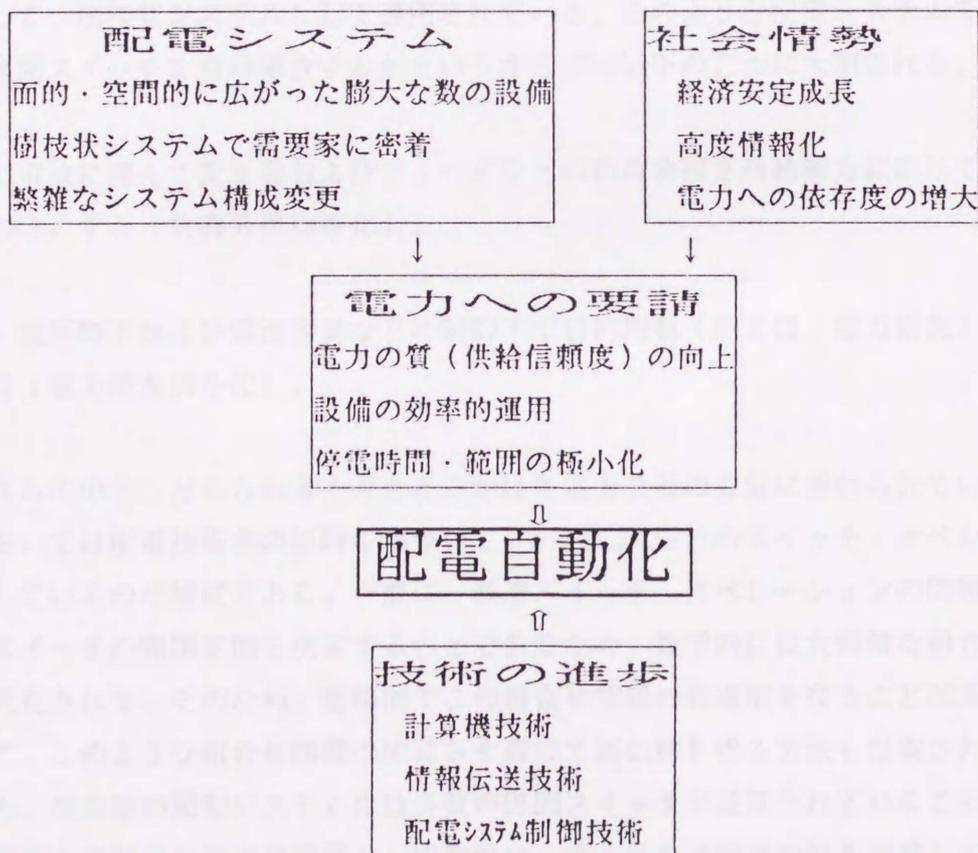


図1.4 配電自動化の環境

システムおよび配電線遠隔監視制御システムで構成される配電自動化システムが一部ではすでに実運用されている。他方において、このような配電自動化のためのハードウェアの進歩と比較して、配電自動化システムに適用可能なソフトウェアの開発は十分であるとは言いがたい。そのため、そのシステムの実際の運用は未だに配電技術者の経験に頼るところが大である。

このような背景の中で、本論文では、配電システムの区間スイッチ操作が自動化されつつあることに着目し、大規模配電自動化システムの実運用面に適用可能な最適スイッチ・オペレーションに関する2, 3のアルゴリズムを提案している。更に、これらのアルゴリズムをソフトウェアとして具体化して、大規模システムに適用することにより妥当性および実用性を検証している。

1. 4 配電システムのスイッチ・オペレーション

1. 4. 1 平常時

我が国の都市部の配電システムは事故に対する信頼性を高めるため、いわゆる常時開放形ループシステムを構成している(第2. 1節参照)。この常時開放形ループシステムは故障検出を容易にするため、フィーダが閉ループを作らないように区間スイッチを適当に開放して、樹枝状システムとして運用されている。このような配電システムで、平常時にどの区間スイッチを常時開放するかという考え方は以下の二つに大別される。

(i) 事故に備えて変圧器およびフィーダなどの負荷分担を供給能力に応じてできるだけ均等にする(負荷分担均等化)。

(ii) 電圧降下および電流容量などの制約下で目的関数(例えば、電力損失)を最適化する(電力損失最小化)。

これらの中で、どちらの考え方をとるかは各電力会社の方針に委ねられている。電力会社においては配電技術者の経験に基づいて、(i)および(ii)のスイッチ・オペレーションを実行しているのが現状である。一般に、最適スイッチ・オペレーションの問題は、多数の区間スイッチの開閉状態を決定することであるため、数学的には大規模な組合せ問題として定式化される。そのため、短時間でこの組合せ問題の最適解を得ることは困難である。そこで、このような組合せ問題の困難さを避けて近似解を得る方法も提案されている。すなわち、都市部の配電システムには多数の区間スイッチが設置されていることに着目して、この問題を連続量の最適化問題として取扱い、得られた連続量の解を調整して元の問題の近似解とする方法である⁽²⁾⁽³⁾。

ここで、これらの問題は平常時のスイッチ・オペレーションとして説明しているが、異常時の保守状態においても理論的には全く同じように考えられることを注意しておこう。すなわち、設備更新または事故区間の修復作業のために、これらの区間がシステムから除去されて、その他の区間がすべて充電されている状態を改めて平常時と考えればよいからである。

ところで、(i)および(ii)の問題の定式化の基礎的データとなる需要(負荷)は、フィーダ単位では把握されているが、各区間負荷はほとんど測定されていない。現状では、需要家の契約電流からフィーダ電流の按分により区間負荷を推定するか、あるいは、必要に応じてカセット・テープレコーダを用いて、特定季節、特定時間帯の負荷を測定記録し⁽⁴⁾、それによってより実際に近い区間負荷を推定しているにすぎない。すなわち、区間の負荷が正確に測定されていなければ、(i)および(ii)の問題に対していかに厳密な解法を用いて解を得ようとも無意味である。そこで、この区間負荷測定をスイッチ・オペレーションによって実行することが考えられる。

- (ii) 任意の区間、あるいは、すべての区間の負荷を必要に応じて実用的な計算時間内で測定する(区間負荷測定)。

1. 4. 2 異常時

配電システムは、一般に戸外にあるため、天候の影響および災害を受け易い。事故が発生した場合(緊急状態)は、故障地点を検出し、事故区間を取囲む区間スイッチを開放して事故区間をシステムから除去する。そのため、事故のため供給支障となった健全区間をスイッチ・オペレーションにより直ちに充電しなければならない。実規模配電システムは緊密に連係しているため、このスイッチ・オペレーションは非常に複雑な作業となっている。そのため、現実には配電技術者の判断に頼るか、あるいは、スイッチ・オペレーションを単純にするため設備の余裕を十分に多くしている。しかしながら、配電技術者を訓練することは多くの費用と時間を必要とし、その上、過剰設備を設けることは経済的ではない。このような背景から、事故時に供給支障となっている健全区間を充電するためのスイッチ・オペレーションが必要となる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

- (ii) 事故時に供給支障となっている健全区間を、他の健全区間から、遮断されている事故区間を迂回するルートを通じて、負荷切替によって充電する(事故時負荷切替)。

この事故時負荷切替問題も、「どの区間負荷をどのフィーダへどのように切替えるのが最適か」を決定することであるから、明らかに組合せ問題になる。そのため、実規模配電システムにおいて負荷切替問題の最適解を得るには、一般に、膨大な計算時間を要する。

1. 5 スイッチ・オペレーションの研究動向

配電システムの自動化に伴い、図1. 2に示すような様々な目的を達成するためのスイッチ・オペレーションに関する研究が1970年頃から始まった。しかしながら、1975年までの研究は理論的な域を出ず、実用的な報告はない。1976年からアメリカ合衆国においてはDOE(Department of Energy)およびEPRI(Electric Power Research Institute Inc.)がこの配電自動化の研究に着手しはじめた。文献(7)では、1969年～1982年の配電自動化に関する161文献を年代順および分野別に系統だてて紹介している。本論文で扱うスイッチ・オペレーションは、この文献では、“変電所自動化とSCADA(Supervisory Control and Data Acquisition)”、および、“フィーダ自動化とコントロール”に分類される。日本においては、1975年～1980年に電力中央研究所から一連の論文が発表されている^{(8)～(12)}。これらの一連の研究は配電システムの供給信頼度向上の立場から、まず、図1. 2に示す健全負荷復旧を、配電線事故および変圧器事故の場合に分けて組合せ的方法によって解いている^{(8)～(9)}。次に、これらの方法をより厳密なものとするため、統計的方法による区間負荷予測手法を開発し⁽¹⁰⁾、文献(8)および(9)の健全負荷復旧方法を改良している⁽¹¹⁾。最後に、図1. 2に示すシステム構成変更に伴う計算機のデータ構造・処理について論じている⁽¹²⁾。

1980年以降、わずかながら論文発表が見られるようになってきており、近年は数も増えてきた。ここで、これらの論文の中からスイッチ・オペレーションに関する代表的なものを概観してみよう。ところで、最適スイッチ・オペレーションの問題は、それぞれの目的に応じて最適なスイッチの開閉状態を決定することであるため、組合せ最適化問題として定式化されることが多い。従って、以下では、この組合せ最適化問題をどのようなアルゴリズムで解くかということに注目しよう。まず、文献(13)では、平常時における負荷分担均等化、異常時における事故点の検出・除去、健全区間復旧およびシステム構成変更を、データ管理とアルゴリズムとを関連づけて総合的に論じている。この中で、負荷分担均等化に対しては列挙法に、そして、健全区間復旧に対しては、復旧可能な区間から順次復旧するという、試行錯誤的な方法に基づくアルゴリズムを提案している。また、配電システムが樹枝状であることに着目して、配電システムをグラフの木構造で表現することにより、事故点の検出・除去およびシステム構成変更を、グラフの“木探索アルゴリズム”に帰着させている。このように、配電システムをグラフ表現することはデータ管理上およびアルゴリズム作成上好都合である。次に、文献(14)では、SCADAシステムおよびディスプレイ・システムの構築について実験的に実施した例を報告している。この中では健全区間復旧に関するスイッチ・オペレーションを中心に論じている。そのアルゴリズムは、負荷切替を行う複数のフィーダを、優先順位に従って段階的に選び、各段階で列挙法により一つのフィーダを選択する、というものである。さらに、文献(15)では、健全区間復旧およびフィー

ダの負荷分担均等化に関するスイッチ・オペレーションを同時に取扱っている。この中では、健全区間復旧の場合には最大または最優先の停電区間負荷を順次最小負荷のフィーダへ切替え、負荷分担均等化の場合には最大負荷フィーダの負荷を、負荷分担がより均等化される限り、列挙法により他のフィーダへ切替えている。また、文献(16)では、健全区間復旧のスイッチ・オペレーションに関して、パーソナルコンピュータ上に余裕容量、電圧降下等の状況を表示しながら運転員の判断によりスイッチ・オペレーションをシミュレートする簡便なソフトウェアを与えている。そして、文献(17)では、過去の健全区間復旧のスイッチ・オペレーションをデータベースに格納しておき、実際に健全区間を復旧する場合にそのデータベースから該当するスイッチ・オペレーション検索する方法を提案している。しかしながら、すべての事故ケースに対するスイッチ・オペレーションを考慮することは困難である。最後に、文献(18)では、図1・2における負荷分担均等化と同じ目的で、平常時システムの安全性を向上させるためのスイッチ・オペレーションをグラフ理論に基づいて論じている。

以上のことから、スイッチ・オペレーションに関する研究は、(i)図1・2に示す事故時復旧状態の健全区間復旧に集中している、(ii)この問題は組合せ最適化問題となっているため、種々のヒューリスティックな解法が工夫されている、(iii)その結果、各電力会社では、それぞれヒューリスティックなアルゴリズムを用いて、この健全区間復旧をはじめとするスイッチ・オペレーションを実施している、ということが分かる。

1.6 本論文の位置づけ

前節で述べたように、配電システムにおける最適スイッチ・オペレーションの問題は組合せ問題になっているため、従来の研究においてはヒューリスティックに解を得ようとする方法が多く見られた。組合せ的問題の最適解を得る基本的な解法は現在のところ列挙法(分枝限定法)が広く用いられている。しかしながら、問題が大規模になれば、最適解を得るのに膨大な演算時間を要するため、実用的な時間内に解を得られないことが多い。そのため、最近では、最適解を得ることをあきらめ、実用的な範囲での近似解を求める方向が主流である。近似解を得る一つの方法は「数理計画的アプローチ」によるものであり、他の一つの方法は「知識工学的アプローチ」によるものである。この知識工学的アプローチは、ヒューリスティックな解法を知識工学の理論に従って再構成したものであり、配電技術者の豊富な経験を必要とする。

本論文の特徴は、配電システムにおけるスイッチ・オペレーションの問題を、数理計画問題として定式化して、高速な近似解法アルゴリズムにより実用的な計算時間内で解くことにある。従来の負荷切替アルゴリズムは、列挙法またはヒューリスティックな方法に基づいているため、そのアルゴリズムの適用は小規模システムに限られていた。それに対し

て、本論文では、図1・2に示す事故時復旧状態の健全区間復旧、負荷分担均等化等の基本的なスイッチ・オペレーションである、負荷切替問題の実用的な近似解法アルゴリズムを提案し、更に、そのアルゴリズムをソフトウェアとして具体化している。従って、本アルゴリズムにおいては、負荷切替問題を数理計画問題として定式化するため、区間負荷が測定されている必要がある。そこで、本論文においては、この負荷切替を応用した区間負荷測定アルゴリズムも与えている。このことにより、配電システム全体を考慮したスイッチ・オペレーションが可能となっている。

以下、各章毎にその概要について記す。

第2章では、配電システムを計算機上で表現するために、配電システムをグラフ的に考察する。まず、配電システムとグラフ用語との対応づけを行う。そして、配電システムはグラフ的には変圧器またはフィーダ引出口を根、開放スイッチを葉、そして配電線を枝とする根付き木からなる森として表現でき、区間スイッチの開閉操作は木を拡大あるいは縮小することに相当することを述べる。この配電システムのグラフ的考察から、配電システムに要求される性質を満足させて区間スイッチの開放位置を変更する際に必要な、区間スイッチの開放位置の変更規則が導かれる。最後に、実規模配電システムの一例を簡単に説明する。この実規模配電システムは、以降の各章で提案されるアルゴリズムの妥当性と実用性を検証するために、しばしば引用される。

第3章では、変圧器およびフィーダの負荷分担均等化の計算方法を提案している。配電システムの円滑な運用上、事故に備えて各変圧器およびフィーダの負荷分担を均等化しておくことが重要である。まず、負荷分担の度合を測るために負荷指標を定義する。次に、二変圧器間の負荷分担均等化を行うためのネットワークを作り、この二変圧器間の負荷切替問題をネットワークフロー問題として定式化する。そして、この問題が部分和问题になっていることに着目して、部分和问题の近似解法アルゴリズムを応用してこの問題を解く、“基本的な計算方法”を作成している。そこで、多数の変圧器の組合せを避けるために、最大および最小の負荷指標を有する二つの変圧器を選択する。そして、これらの変圧器に基本的な計算方法を繰返し適用して各変圧器の負荷分担を均等化する。その後で、各変圧器に接続するフィーダに対して、同様の方法で、負荷分担を均等化している。以上の考え方をまとめて、負荷分担均等化アルゴリズムを作成している。さらに、この考え方を作業停電（保守状態）のシステムに応用することにより、“作業停電の負荷分担均等化アルゴリズム”を作成している。この作業停電は、作業区間をシステムから除去するという意味では、理論的に事故区間を修復している場合と同じであるため、この作業停電の負荷分担均等化アルゴリズムは事故停電（保守状態）のシステムに対しても適用可能である。最後に、ここで提案している負荷分担均等化アルゴリズムを実規模システムに適用することにより、その妥当性と実用性を検証している。

第4章では、簡単のため、変圧器およびフィーダに十分余裕があるものと仮定して、グ

ラフに基づく区間負荷測定の基本計算方法を提案している。まず、区間負荷測定においては、フィーダ間の供給区域を分離している開放スイッチ（葉）が中心的な役割を果たすことを述べる。その上で、任意区間の負荷測定と変圧器の供給区域内のすべての区間負荷測定との二通りに分けて、区間負荷測定アルゴリズムを提案している。最初に、任意区間の負荷測定は、その区間（枝）のフィーダ引出口（根）と反対方向に連結するカットスイッチ（葉）の探索に帰着されることを示す。次に、変圧器の供給区域は各フィーダ引出口を根とする根付き木よりなる森で表されることに着目し、変圧器の供給区域内のすべての区間負荷は、根付き木を順次縮小することにより、組織的に測定できることを示す。最後に、これら二通りの負荷測定方法を実規模システムに適用して、ここで提案する負荷測定方法の妥当性と有効性を検証している。

第5章では、第4章で明らかにされた区間負荷測定の基本計算方法の実用性を一層明らかにするため、電圧降下および容量制約を考慮した区間負荷測定方法を提案している。すなわち、区間負荷の測定途中において、その時点で大まかに予測されている区間負荷を用いて計算された電圧降下および電流容量に制約違反が発生するような場合には、他フィーダからの融通によってその制約違反を事前に解消しながら負荷測定を行い、正確な区間負荷を得る方法である。最初に、電圧降下および容量制約の監視点の定め方を述べ、各フィーダの現時点の制約に関する余裕量および違反量の評価方法を定義する。次に、区間負荷の測定途中において、制約違反が発生するようなスイッチ操作が行われるようならば、事前に制約違反の解消に最も効率的なフィーダから融通する。このようなフィーダの選択問題は、本質的には複雑な組合せ計画問題になっているので、有効勾配法の概念を用いた近似解法によって実用的な演算時間内で解を得ている。以上の解法をまとめて、一フィーダ全区間負荷測定方法および任意区間の負荷測定方法を提案している。最後に、これらの区間負荷測定方法を実規模システムに適用して、それらの妥当性と実用性を検証している。

第6章では、区間負荷が測定されているという条件の下で、電流容量制約を付した、組織的で実用的な事故時負荷切替方法を提案している。すなわち、事故区間を除いた全停電区間を、あらかじめ指定された応援順序で他の変圧器から電流容量制約下で負荷切替によって効率良く、許容時間内に復旧する方法である。この方法の特徴は、(i)変電所間の物理的な距離または配電システムの特性などから、あらかじめ応援変圧器を指定できる、(ii)アルゴリズムが簡潔で段階的に構成されている、などである。まず、負荷切替問題は、応援側変圧器をソース、停電となっている健全区間をシンクとするネットワークのネットワークフロー問題として定式化できることを示す。次に、この問題において負荷切替量を最大化するために、部分和問題の近似解法などにより段階的に近似解を得る負荷切替アルゴリズムを提案している。この負荷切替アルゴリズムを順次指定された応援側変圧器をソースとして、全停電区間が復旧されるまで繰り返し適用する。もし、負荷切替途中において変圧器またはフィーダの電流容量に制約違反が発生するようならば、この負荷切替アルゴリ

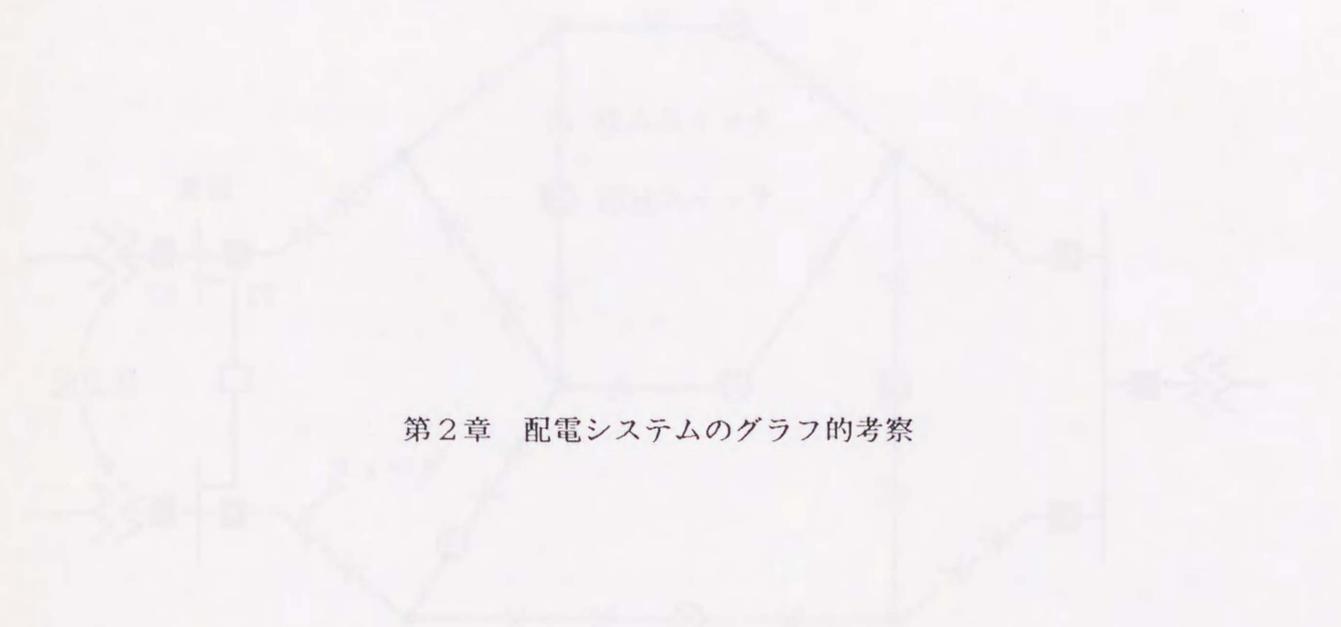
ズムを再帰的に適用することにより、制約違反を事前に解消している。最後に、これらの負荷切替アルゴリズムを、実規模システムにおいて想定される変圧器事故に適用して、ここで提案している負荷切替アルゴリズムの妥当性と実用性を検証している。

第7章では、区間負荷が測定されているという条件の下で、電圧降下および容量制約を考慮した実用的な事故時負荷切替方法を提案している。ここで提案している負荷切替方法においては、双対有効勾配法の概念を用いているため次のような特長がある。すなわち、(i) 応援フィーダの優先順位を考慮できる、(ii) 停電負荷が小さい時には高速に解が得られる、(iii) 制約違反解消に効果があるスイッチ操作だけが実施される、(iv) 従って、運転員になじみのある負荷切替手順が得られる、などである。まず、事故区間を除いた全停電区間を、一旦制約を考慮せずに、すべて復旧するものと仮定する。もし、ここで制約違反が発生しなければ、そこで負荷切替を完了できる。次に、制約違反が発生する場合には、応援フィーダ側に制約違反が発生しない範囲で、制約違反の解消に効果が大きい負荷から順に応援フィーダ側に切替える（融通）手順を、制約違反がなくなるまで多段階的に繰返す。この融通の結果においても制約違反が残る場合には負荷遮断を行う。その場合には、スイッチの開放位置の微調整を行って遮断負荷の再復旧を試みる。以上の考え方をまとめて事故時負荷切替アルゴリズムを提案している。最後に、この負荷切替アルゴリズムを実規模システムに適用して、本アルゴリズムの妥当性および実用性を検証している。

第8章は、以上の総括であり、各章毎に得られた結果を要約している。

第 2 章

配電システムのグラフ的考察



第2章 配電システムのグラフ的考察

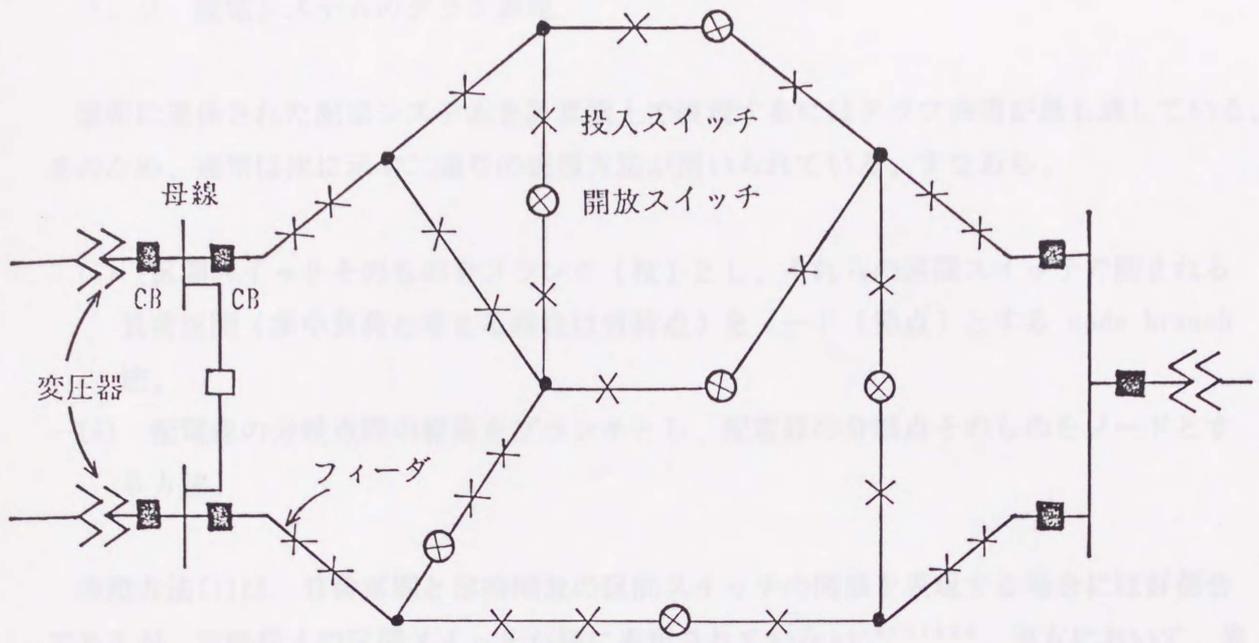
2.1 常時開放形ループ配電システム

我が国の都市部の高圧配電システムは、事故発生時の復旧作業を容易にするため緊密に連係されている。また、故障地点の検出を容易にするため、フィーダが閉ループを作らないように区間スイッチを適当に常時開放して樹枝状で運用されている。このような配電システムにおいては、各負荷地点はただ一つの変圧器またはフィーダから電力を供給されており、樹枝状であるため閉ループは構成されない。そこで、このような配電システムを”常時開放形ループ配電システム”と呼ぶことにする。ここで、この常時開放形ループ配電システムの性質をまとめておく。

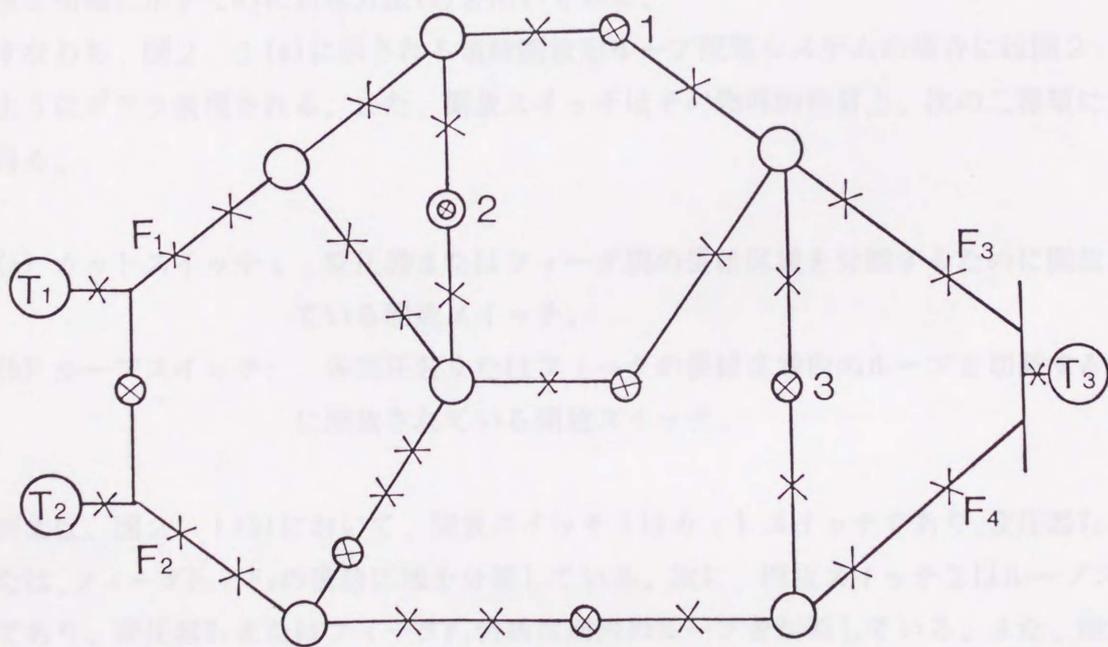
【常時開放形ループ配電システムの性質】

- I. 各負荷地点は、ただ一つの変圧器またはフィーダから供給される。
- II. 閉ループは存在しない。

常時開放形ループ配電システムの簡単な例を図2.1(a)に示す。実規模の常時開放形ループ配電システムにおいては、事故時の供給支障健全区域をなるべく狭くするため、配電線上に多数の区間スイッチが設置されており、最近では自動遠隔操作可能なものが増える傾向にある。そのため、本論文でも将来の配電自動化システムを想定して、区間スイッチの操作は自動遠隔操作可能なもののみを対象としている。



(a) 常時開放形ループ配電システム



- | | |
|--------------|---------------------|
| T_i : 変圧器 | ×: 投入スイッチ |
| F_j : フィーダ | ⊗: 開放スイッチ (カットスイッチ) |
| ○: 分岐点 | ⊙: 開放スイッチ (ループスイッチ) |

(b) グラフ表現

図 2. 1 常時開放形ループ配電システムのグラフ表現

2. 2 配電システムのグラフ表現

緊密に連係された配電システムを計算機上で表現するにはグラフ表現が最も適している。そのため、通常は次に示す二通りの表現方法が用いられている。すなわち、

- (i) 区間スイッチそのものをブランチ（枝）とし、それらの区間スイッチで囲まれる負荷区間（集中負荷と考える場合は負荷点）をノード（節点）とする node-branch 法。
- (ii) 配電線の分岐点間の線路をブランチとし、配電線の分岐点そのものをノードとする方法。

表現方法(i)は、負荷区間と常時開放の区間スイッチの関係を表現する場合には好都合であるが、常時投入の区間スイッチが陽に表現されていない^{(8)~(18)}。他方において、表現方法(ii)は、区間スイッチの開閉状態を陽に表現しているが、ノードに物理的な意味がない。本論文においては、区間スイッチの開閉状態に注目するので、区間スイッチの開放位置を明確に示すために表現方法(ii)を用いている。

すなわち、図2. 1(a)に示される常時開放形ループ配電システムの場合には図2. 1(b)のようにグラフ表現される。また、開放スイッチはその物理的性質上、次の二種類に定義し得る。

- (a) カットスイッチ： 変圧器またはフィーダ間の供給区域を分離するために開放されている開放スイッチ。
- (b) ループスイッチ： 各変圧器またはフィーダの供給区域内のループを切断するために開放されている開放スイッチ。

例えば、図2. 1(b)において、開放スイッチ1はカットスイッチであり、変圧器 T_1 と T_3 、または、フィーダ F_1 と F_3 の供給区域を分離している。次に、開放スイッチ2はループスイッチであり、変圧器 T_1 またはフィーダ F_1 供給区域内のループを切断している。また、開放スイッチ3の場合には、変圧器 T_3 の供給区域内のループを切断しており（ループスイッチ）、同時にフィーダ F_3 と F_4 の供給区域を分離している（カットスイッチ）。すなわち、開放スイッチ3は変圧器を基準とすればループスイッチであるが、フィーダを基準とすればカットスイッチとなる。

しかしながら、配電システムの最適スイッチ・オペレーションの問題に依存して、変圧器またはフィーダを基準にするかを適宜定めることができ都合が良いため、以上のように用語を定義しておく。以降の章においては、変圧器またはフィーダのいずれを基準にす

るかを明記している。

ここで、配電システムとグラフとの間で次のような対応を考える（図2.2参照）。

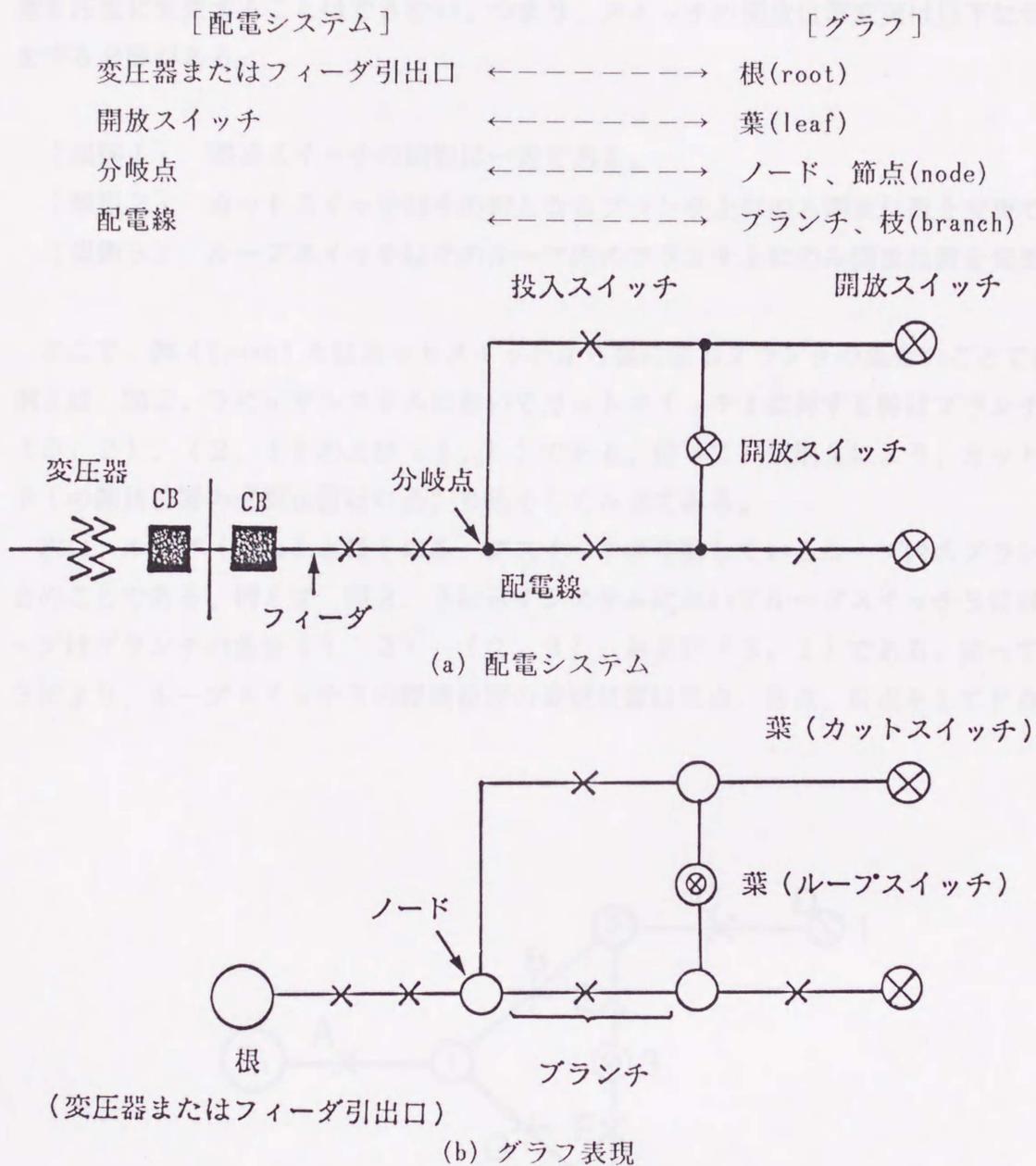


図2.2 配電システムとグラフとの対応

この対応によって、常時開放形ループ配電システムは以下のようにグラフ表現できる。

「常時開放形ループ配電システムは、各変圧器またはフィーダを根とする根付き木よりなる森を構成する。また、開放スイッチは根付き木の葉に対応しており、カットスイッチとループスイッチに分類される。」

2.3 区間スイッチの開放位置変更規則

常時開放形ループ配電システムに要求される性質を満たすためには、スイッチの開放位置を任意に変更することはできない。つまり、スイッチの開放位置変更は以下に示す規則を守る必要がある。

- [規則1] 開放スイッチの総数は一定である。
- [規則2] カットスイッチはその幹となるブランチ上にもみ開放位置を変更できる。
- [規則3] ループスイッチはそのループ内のブランチ上にもみ開放位置を変更できる。

ここで、幹 (trunk) とはカットスイッチから根に至るブランチの集合のことである。例えば、図2.3に示すシステムにおいてカットスイッチ1に対する幹はブランチの集合 (D, 2)、(2, 1) および (1, T₁) である。従って、規則2により、カットスイッチ1の開放位置の変更位置はC点、B点そしてA点である。

次に、ループ (loop) とはそのループスイッチが切断しているループ内のブランチの集合のことである。例えば、図2.3に示すシステムにおいてループスイッチ3に対するループはブランチの集合 (1, 2)、(2, 3)、および (3, 1) である。従って、規則3により、ループスイッチ3の開放位置の変更位置はE点、B点、G点そしてF点である。

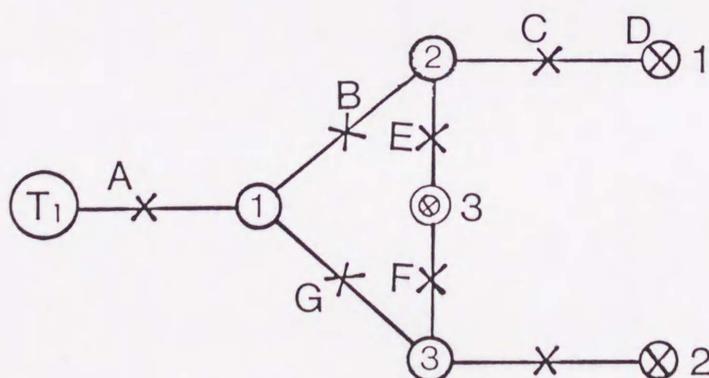


図2.3 幹とループ

2. 4 実規模配電システムの例

第3章以降の各章で提案するアルゴリズムの妥当性と実用性を検証するために用いる実規模の常時開放形ループ配電システムを図2. 4に示す。このシステムの定格電圧は6.6 [KV]であり、5変電所(A~E)、11変圧器、87フィーダ および 577区間スイッチで構成されている。図2. 4では、常時開放スイッチの開放位置は記号●で示されている。なお、繁雑さを避けるために、投入スイッチ位置は省略している。

次に、このシステムの平常時における各変圧器の容量、負荷および余裕容量を表2. 1に示す。この表から、変圧器の総供給能力は14,310 [A]であり、システムの総負荷は11,633 [A]であることが分かる。また、フィーダの線路電流容量は、一部のフィーダ(125 [A])を除いて、455 [A]である。

表2. 1 変圧器の容量、負荷および余裕容量

変電所	A		B				C		D		E
変圧器	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁
容量[A]	900	900	2000	2000	900	600	1500	2310	900	1100	1200
負荷[A]	772	633	1539	1697	726	327	1258	2033	674	924	1050
余裕容量[A]	128	267	461	303	174	273	242	277	226	176	150

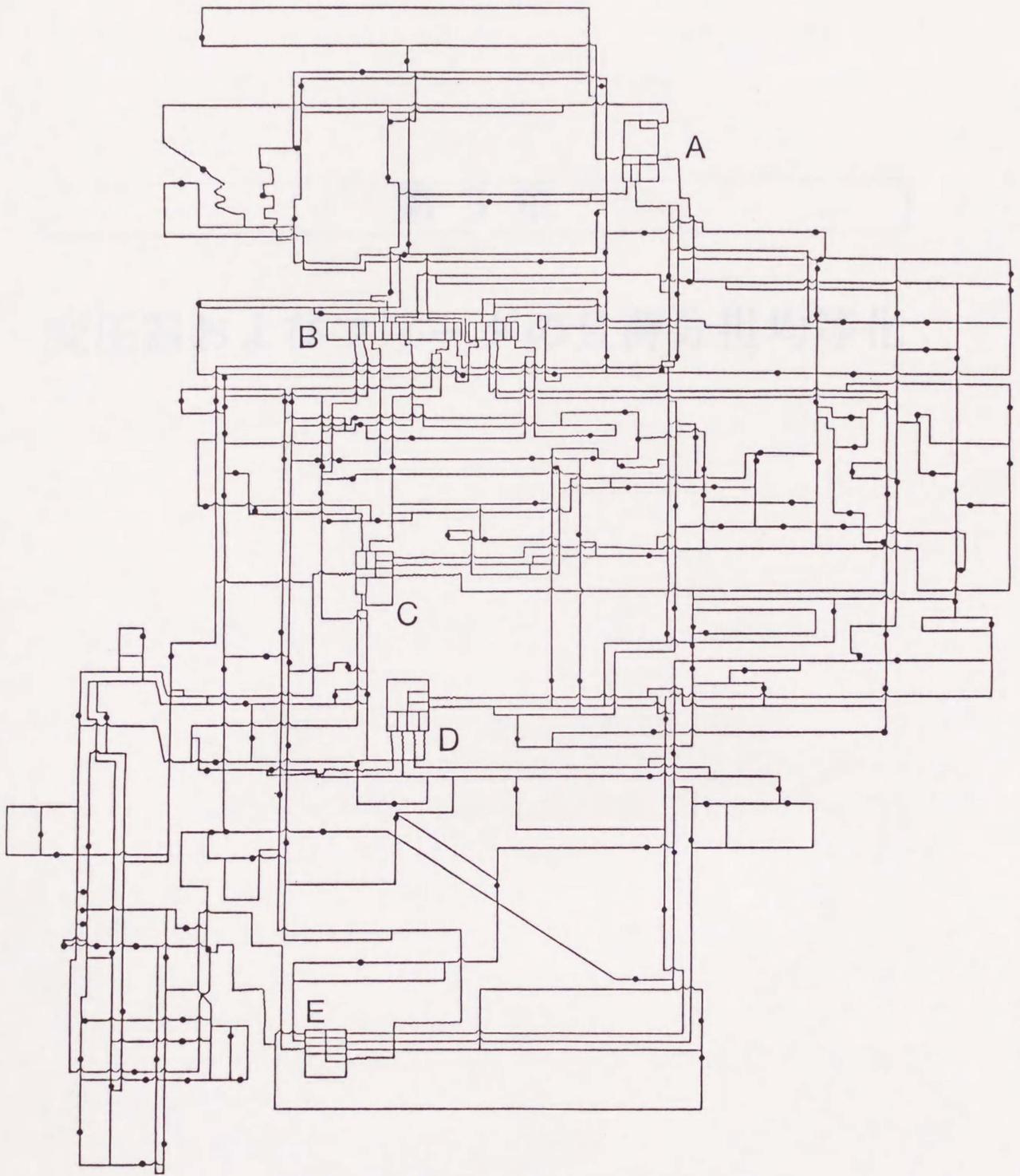


図2.4 実規模配電システム

第 3 章

変圧器およびフィーダの負荷分担均等化

第3章 変圧器およびフィーダの負荷分担均等化

3.1 概要

常時開放形ループ配電システムで、平常時にどの区間スイッチを常時開放するかという考え方は以下の二つに大別される。

- (i) 事故に備えて変圧器およびフィーダなどの負荷分担を供給能力に応じてできるだけ均等にする。
- (ii) 電圧降下および電流容量などの制約下で目的関数(例えば、電力損失)を最適化する。

これらの中で、どちらの考え方をとるかは各電力会社の方針に委ねられている。この(ii)については、すでに研究されているので^{(2) (3)}、本論文ではこの(i)の立場から、変圧器およびフィーダの負荷分担を均等化する区間スイッチの開放位置を定める計算方法を提案している。この負荷分担均等化の計算方法は平常時および異常時の保守状態に適用可能である。なぜならば、設備更新または事故区間の修復作業のためにこれらの区間がシステムから除去されている状態を改めて平常時と考えればよいからである。

本章では、区間負荷が既知という条件の下に、変圧器およびフィーダの容量制約下で、二つの変圧器(またはフィーダ)間の負荷分担を組織的に均等化させるアルゴリズムを作成し、このアルゴリズムを繰返し適用することにより、全システムの負荷分担を均等化させる計算方法を提案している^{(19)~(23)}。

以下では、まず、負荷分担の程度を測るために負荷に対する供給能力の比を負荷指標と定義し、二変圧器(またはフィーダ)間の負荷分担を均等化する”基本的な計算方法”を提案する。次に、多数の変圧器の組合せを避けるために、最大および最小の負荷指標を有する二つの変圧器にこの基本的な計算方法を適用して、二変圧器間の負荷分担を均等化させている。この操作を繰返すことにより、まず、すべての変圧器の負荷分担を均等化させる。その後で、各変圧器に接続するフィーダに対して、同様の方法で、フィーダ間の負荷

分担を均等化させている。さらに、この考え方を作業停電（保守状態）のシステムに応用できることを示している。最後に、ここで提案している負荷分担均等化アルゴリズムをソフトウェアとして具体化して、第2章で示した実規模システムに適用することにより、本アルゴリズムの妥当性と実用性を検証している。

なお、本章では、変圧器間の負荷分担均等化をフィーダ間のそれよりも優先しているので、変圧器を根とする根付き木を採用している。

3. 2 問題の記述

3. 2. 1 記号の定義

b_s : 変圧器 s の余裕容量 (= 容量 - 負荷)

f_j : フィーダ F_j の引出口の余裕容量 (= 容量 - 負荷)

r : システムの負荷指標 = システムの総負荷 / システムの総供給能力

システムの総負荷 = $\sum(T_i$ の負荷),

システムの総供給能力 = $\sum \min(T_i$ の容量, T_i の総フィーダ容量)

r_i : T_i の負荷指標 = T_i の負荷 / T_i の供給能力

T_i の供給能力 = $\min(T_i$ の容量, T_i の総フィーダ容量)

β^i : T_i に接続するフィーダの負荷指標 = T_i の負荷 / T_i の総フィーダ容量

β_j : F_j の負荷指標 = F_j の負荷 / F_j の容量

3. 2. 2 問題の説明

〔仮定〕

- (1) 各区間の負荷は既知である。
- (2) 変圧器およびフィーダの容量制約を満足するシステムの初期状態が与えられている。
- (3) 各フィーダの線路電流容量は同一である。

〔問題〕

常時開放形ループ配電システムの性質を満足し、変圧器容量およびフィーダの線路電流容量の制約下で、各変圧器およびフィーダの負荷分担が均等化されるような区間スイッチの開放位置を決定する。

問題の説明を容易にするため、ここでは、図3. 1に示すモデルシステムを用いる。

3.3 問題の解法

3.3.1 解法の概要

区間スイッチの開閉操作を自由に行うと解法が困難なので、以下の規則を設けた。

(a) すべての変圧器の負荷分担均等化を同時に行うのではなく、最大および最小の負荷指標を有する二つの変圧器間の負荷分担を均等化する。以上の計算の後、再び最大および最小の負荷指標を求め、この二変圧器間の負荷分担を均等化する。以上の計算を繰返し、全体の変圧器の負荷分担を均等化する。フィーダの負荷分担均等化も同様である。

(b) 二変圧器（フィーダ）間の負荷分担の均等化では、二変圧器（フィーダ）間のループスイッチを固定し、カットスイッチのみ開放位置の変更を行う。その結果、ループスイッチの開放位置を調整することにより、二変圧器（フィーダ）間の負荷分担がより均等化される可能性が残される。

(c) すべての変圧器間の負荷分担均等化が、一旦終了した後で、各変圧器毎にその変圧器に接続するすべてのフィーダ間の負荷分担均等化を行う。ここでも、変圧器の場合と同様に、最大および最小の負荷指標を求め、この二フィーダ間の負荷分担を均等化する。

このフィーダ間の負荷分担均等化は、(b)において固定されていたループスイッチの開放位置を変更することにより実行されている。そのため、すべてのフィーダ間の負荷分担均等化を行った後で、再び(a)において変圧器間の負荷分担均等化を行う。

3.3.2 問題の定式化

最小および最大の負荷指標を有する二変圧器間またはフィーダ間の負荷分担均等化の問題は、これらの変圧器またはフィーダを、それぞれ、ソース s およびシンク t に対応づけると、二つのノードをもつネットワークのカットスイッチの開放位置の移動による負荷切替に帰着される。

一般に s 、 t 間の負荷切替は図 3.2 に示すようなネットワークで表される。ここで、第 3.3.1 節(b)で述べたようにループスイッチを固定し、また、簡単のため、カットスイッチの開放位置の移動範囲を分岐点の直前の位置までに限定する。すなわち、ここではループスイッチ 4 および 5 を固定し、カットスイッチ 1、2 および 3 の開放位置の移動範囲をそれぞれ A 点、B 点 および C 点までに限定する。

また、複数のカットスイッチが同一の分岐点の直前で開放されたならば、それらのカットスイッチに対応する s 側のフィーダ引出口の余裕容量が多いカットスイッチの開放位置を分岐点を越えて移動させる。例えば、図 3.2 においてカットスイッチ 2 および 3 がそれぞれ B 点 および C 点で開放されている場合に、 $f_1 > f_2$ ならばカットスイッチ 2 の開放位置を D 点に移動させる。

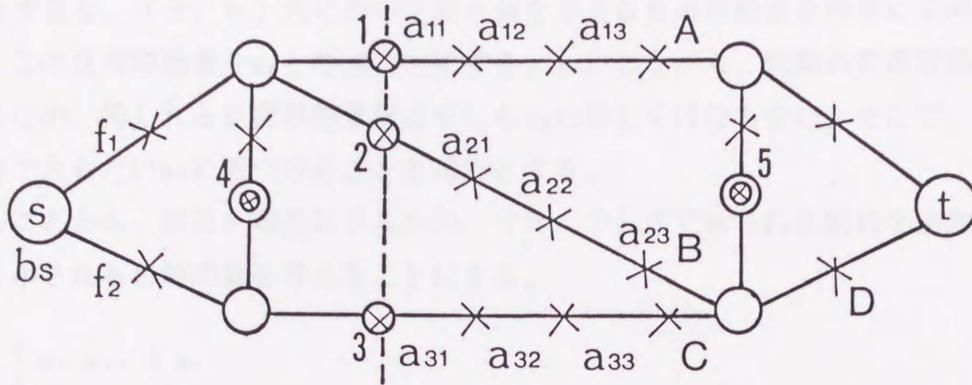


図3.2 s、t間の負荷切替

以上のことから、簡単のため、図3.2に示すネットワークを用いてs、t間の負荷切替問題を定式化する。

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 a_{ij} x_{ij} \leq \min(b_s, f_1) \quad (3.1)$$

$$\sum_{j=1}^3 a_{3j} x_{3j} \leq \min(b_s, f_2) \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{ij} x_{ij} \leq b_s \quad (3.3)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (3.4)$$

$$x_{ij} \geq x_{i(j+1)} \quad (3.5)$$

$$\sigma = (r - r_s)^2 + (r - r_t)^2 \rightarrow \min \quad (3.6)$$

ただし、 a_{ij} はカットスイッチ*i*からシンク*t*側へ向かって*j*番目の区間負荷である。そして、 x_{ij} は0-1変数であり、カットスイッチ*i*からシンク*t*側へ向かって*j*番目の区間がソース*s*の供給区域に属するならば1、そうでなければ0である。題意からソース*s*の供給区域は連続的に拡大する必要があるため、(3.5)式に示す制約式が付く。

3.3.3 近似解法

ソース*s*の負荷指標が最小であるから、(3.1)式～(3.5)式の制約下で、カットスイッチの開放位置を*t*側へ移動すれば、*s*の負荷が増大し、*t*の負荷が減少して負荷分担がより均等化される。ここで、(3.6)式で示される目的関数 σ に注目しよう。初期状態においては、 $r_s < r < r_t$ に対する σ の値が求められている。いま、*s*から*t*へカットスイッチの開放位置を移動させると、負荷移動量に応じて r_s が増加し r_t が減少して、 σ がよ

り小になる。すなわち、 σ は負荷移動量の関数となっている。そこで、負荷移動量を連続量と仮定すると、(3.6)式において最小値を与える負荷移動量を簡単に求めることができる。この負荷移動量を q_0 と呼ぶことにする。しかしながら、実際の負荷移動量は離散量であるため、得られる負荷移動量は必ずしも q_0 に等しくはならない。そこで、この負荷移動量をできるだけ q_0 に近づけることを目的とする。

以上のことから、解法を容易にするため、(3.7)式で示される制約を追加し(3.8)式で示される目的関数を考えることにする。

$$\sum_i \sum_j a_{ij} x_{ij} \leq q_0 \quad (3.7)$$

$$\sum_i \sum_j a_{ij} x_{ij} \rightarrow \max \quad (3.8)$$

その結果、この問題は一種の部分和问题になっているので⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾、部分和问题の近似解法アルゴリズムを応用することによって解くことができる。この近似解法を、ソース s とシンク t との間の負荷分担均等化の”基本的な計算方法”と呼ぶことにする。

3.4 負荷分担均等化アルゴリズム

第3.3.3節で述べた基本的な計算方法に基づく負荷分担均等化のアルゴリズムを図3.3に示す。図3.1に示すシステムを用いてアルゴリズムを説明する。ステップ1において変圧器 T_2 および T_1 がそれぞれ s および t として選ばれたとすると、ステップ2においてはカットスイッチ1, 2および7が基本的な計算方法において対象となる。このようにして、ステップ0～ステップ3が繰返し実行されて変圧器 T_2 および T_1 の負荷分担の均等化が終了する。次に、ステップ4において変圧器 T_1 に接続する3本のフィーダの中で、フィーダ F_2 および F_1 がそれぞれ s および t として選ばれたとすると、ステップ5においては図3.1のループスイッチ12のみが対象となる。このように、フィーダ間の負荷分担均等化においては、2本のフィーダが s, t となるためステップ5における基本的な計算方法では、それらのフィーダ間のループスイッチが対象となる。すなわち、これらのループスイッチが図3.2におけるカットスイッチに対応している。

このようにして、ステップ4～ステップ6を繰返すことにより変圧器 T_1 に接続する3本のフィーダの負荷分担が均等化される。そして、ステップ7を経てステップ4において例えば変圧器 T_2 が選ばれたとすると、4本のフィーダに関してステップ4～ステップ6が繰返される。すべての変圧器について、ステップ4～ステップ6が実行されたあとでループスイッチの開放位置が移動した場合は、再びステップ0に戻る(第3.3.1節(c)参照)。

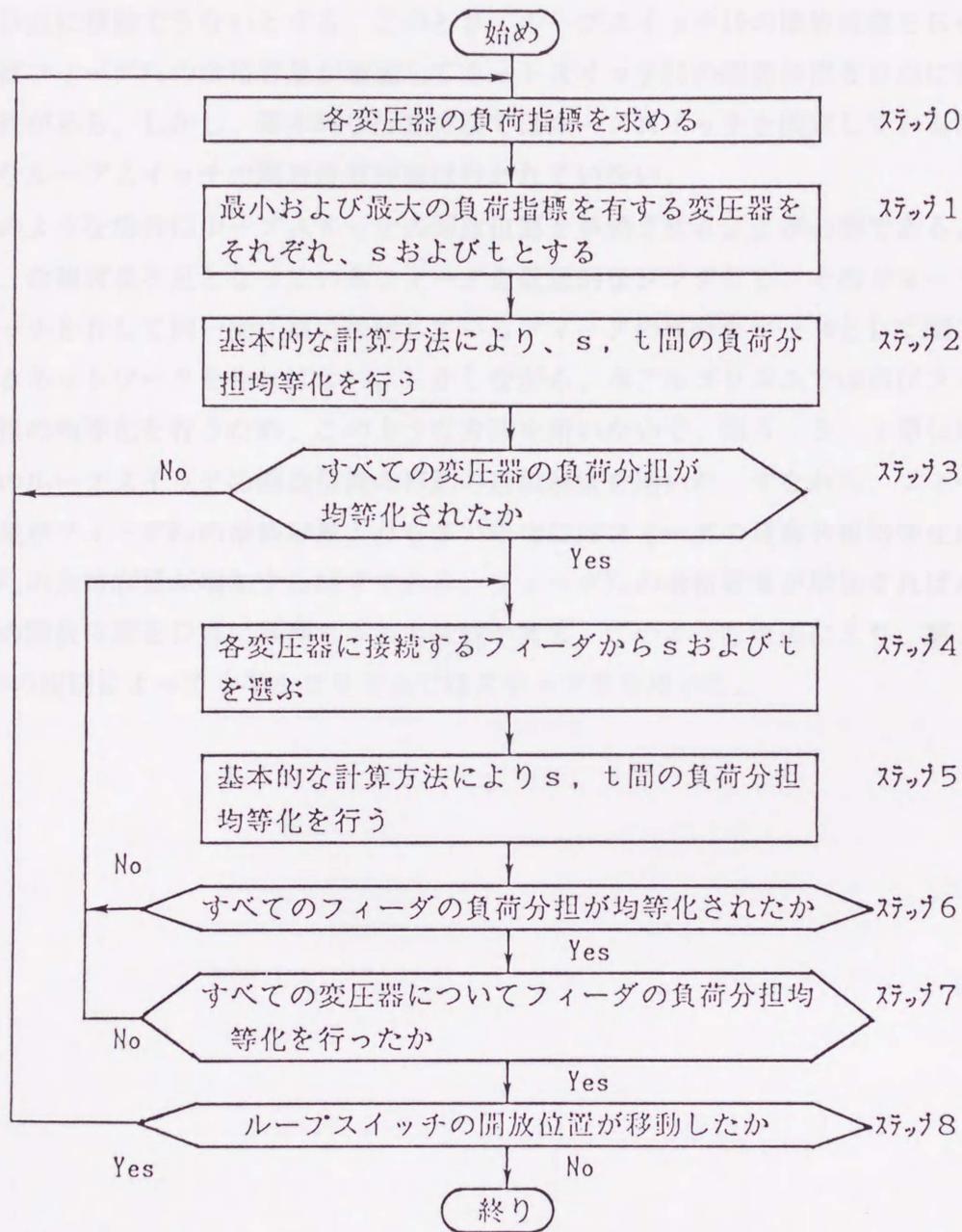


図 3. 3 負荷分担均等化アルゴリズム

そうでなければ、これ以上の負荷分担均等化はできないので終了する。

ここで、ステップ8を用いた理由を述べておく。いま、変圧器 T_2 および T_3 をそれぞれsおよびtとする。このときフィーダ F_5 の余裕容量不足のためにカットスイッチ11の開放位置をD点に移動できないとする。このとき、ループスイッチ15の開放位置をE点に移動させればフィーダ F_5 の余裕容量が増加してカットスイッチ11の開放位置をD点に移動できる可能性がある。しかし、基本的な計算方法ではループスイッチを固定しているため、このようなループスイッチの開放位置移動は行われていない。

このような場合にループスイッチの開放位置を移動させることが必要である。そのためには、余裕容量不足となっているフィーダを仮想的なシンクとし、そのフィーダとループスイッチを介して同一変圧器に接続しているフィーダの集合をソースとして図3.2に相当するネットワークを作ればよい。しかしながら、本アルゴリズムでは再びフィーダの負荷分担の均等化を行うため、このような方法を用いなくて、第3.3.1節(c)の規則で以上のループスイッチの開放位置の移動の近似解法を用いた。すなわち、フィーダ F_4 の余裕容量がフィーダ F_5 の余裕容量よりも多い場合にはフィーダの負荷分担均等化によってフィーダ F_5 の余裕容量が増加するはずである。フィーダ F_5 の余裕容量が増加すればカットスイッチ11の開放位置をD点に移動できる可能性がある。このような理由により、第3.3.1節(c)の規則によって本アルゴリズムではステップ8を用いた。

3.5 数値例と考察

図3.4に示すシステムを用いて数値例を示す。変圧器 T_1 、 T_2 および T_3 の容量をそれぞれ120、100および80とし、フィーダの線路電流容量を90とする。表3.1は変圧器の負荷分担均等化の過程を表す。記号 l_i は変圧器 T_i の負荷を表す。また、反復0はシステムの初期状態を示す。システムの総負荷は192である。そして、各変圧器の供給能力は、この例では変圧器容量に等しくなっているため300となる。従って、 $r=0.64(=192/300)$ となる。

まず、図3.3に示すアルゴリズムのステップ1において変圧器 T_2 および T_1 がそれぞれsおよびtとして選ばれる。ステップ2においてカットスイッチ1、2および7の開放位置を図3.4の矢印1に示すように、移動することによって20の負荷移動を行う(表3.1の反復1)。その結果、 r_2 が増加し、 r_1 が減少して σ が0.56から0.20へ減少する。そこで、ステップ1に戻ると、変圧器 T_2 および T_1 間の負荷分担均等化は終了しているため、変圧器 T_2 および T_3 をそれぞれsおよびtとして選び、ステップ3においてカットスイッチ11の開放位置を図3.4の矢印2に示すように移動する。その結果、 σ が0.20から0.15へ減少する(表3.1の反復2)。このように、ステップ0～ステップ3を繰り返すことにより変圧器の負荷分担が均等化される。

次に、ステップ4以降においてフィーダの負荷分担の均等化を行う。ここで、表3.2の反復(0)は変圧器の負荷分担が均等化されたときの各フィーダの負荷(l)および負荷指標(β)を表す。いま、ステップ4において変圧器 T_1 が選ばれたとする。そのとき、変圧器 T_1 に接続する3本のフィーダからフィーダ F_2 および F_1 がそれぞれsおよびtとして選ばれることになる。ステップ5においてループスイッチ12の開放位置を図3.4の矢印(1)に示すように移動することによって48の負荷移動を行う(表3.2の反復(1))。その結果、 σ が0.77から0.50へ減少する。変圧器 T_1 に接続するフィーダの負荷分担均等化はここで終了する。また、変圧器 T_2 に接続するフィーダの負荷分担はこれ以上均等化されない。なお、変圧器 T_3 の供給区域にはループスイッチが存在しないので、フィーダの負荷分担の均等化は実行されていない。実際のシステムにおいてはこのような例は少ない。

以上のように、ステップ4～ステップ7を繰り返すことにより、すべてのフィーダの負荷分担が均等化される。更に、ループスイッチの開放位置が移動したので、第3.3.1節(c)で述べた理由によりステップ8を経てステップ0に戻る。この例ではこれ以上の負荷分担が均等化されることなく終了する。

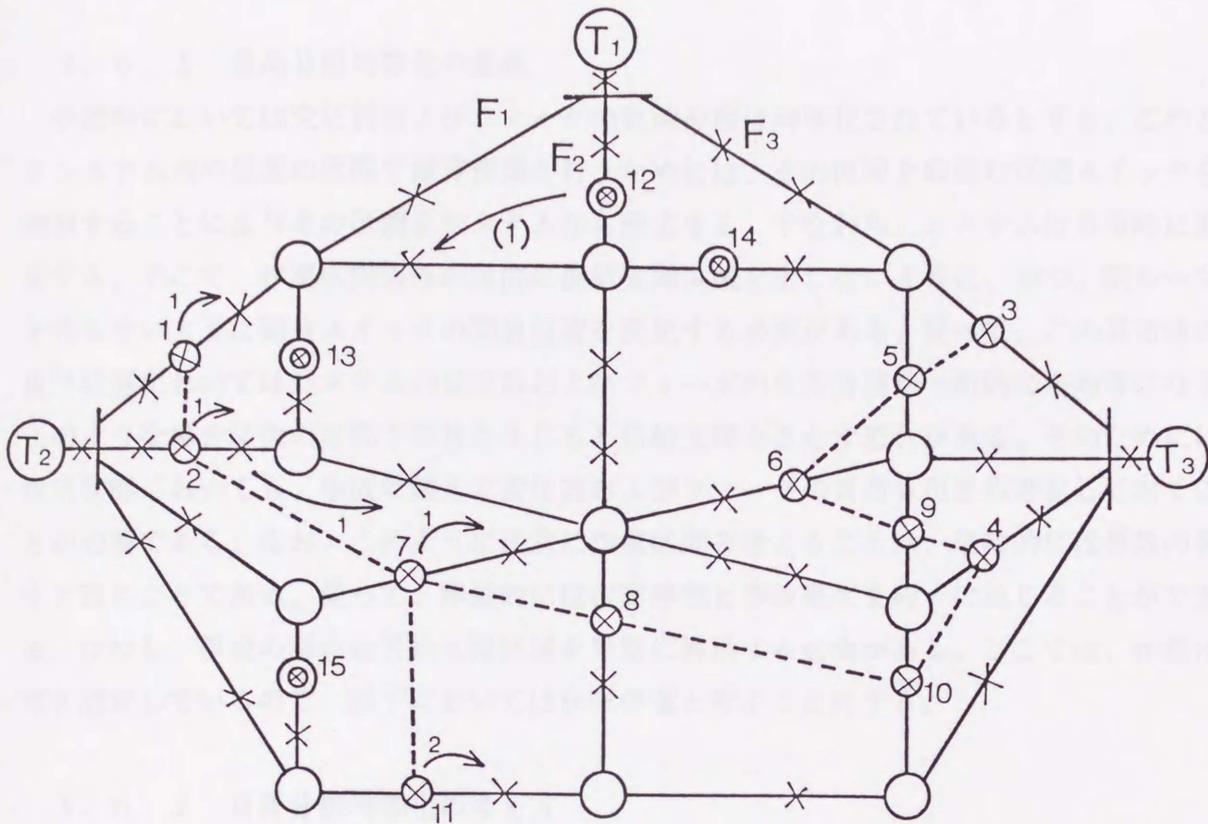


図3. 4 負荷分担均等化のスイッチ・オペレーション

表3. 1 変圧器の負荷分担均等化

変圧器 反復	T ₁		T ₂		T ₃		σ
	L ₁	r ₁	L ₂	r ₂	L ₃	r ₃	
0	105	0.88	34	0.34	53	0.66	0.56
1	85	0.71	54	0.54	53	0.66	0.20
2	85	0.71	56	0.56	51	0.66	0.15

表3. 2 フィーダの負荷分担均等化

フィーダ		1		2		3		4		σ
変圧器	反復	ℓ	β	ℓ	β	ℓ	β	ℓ	β	
T ₁	(0)	63	0.70	3	0.03	19	0.21			0.77
	(1)	15	0.17	51	0.57	19	0.21			0.50
T ₂	(0)	6	0.07	19	0.21	15	0.17	16	0.18	0.18
T ₃	(0)	5	0.06	19	0.21	5	0.06	22	0.24	0.34

3.6 作業停電

3.6.1 負荷分担均等化の意義

平常時においては変圧器およびフィーダの負荷分担は均等化されているとする。このときシステム内の任意の区間で保守作業を行うためには、その区間を取囲む区間スイッチを開放することによりその区間をシステムから除去する。すなわち、システムは異常時に遷移する。そこで、作業区間以外の区間に供給支障区域を生じないように、かつ、閉ループを作らないように開放スイッチの開放位置を変更する必要がある。従って、この異常時の保守状態においてはシステムの変圧器およびフィーダの負荷分担が一時的に不均等になる。このような場合に他の区間で事故を生じると供給支障をきたす恐れがある。そのためには、保守状態においても、事故に備えて変圧器およびフィーダの負荷分担を均等化しておくことが必要である。なお、このように任意に作業区間を考えることは、理論的には事故の発生と同じことである。従って、理論的には作業停電と事故発生を同一に論じることができる。ただし、事故の場合は供給支障区域を早急に解消する必要がある。ここでは、作業停電を想定しているので、以下においては作業停電と呼ぶことにする。

3.6.2 負荷分担均等化の考え方

説明を容易にするために図3.5に示すシステムを考える。図3.5は図3.1に示されるシステムを初期状態として、図3.4に示すスイッチの開放位置の移動によって、変圧器およびフィーダの負荷分担が均等化された状態を表している。

作業区間または事故区間としては、図3.5のWのように、分岐点を含みかつ必ずしも開放スイッチに隣接しない区間を考えておけば十分である。

さて、保守状態（作業停電または事故区間の修復）において、作業区間または事故区間を取囲む区間スイッチを開放することによりその区間をシステムから除去する。そのため、その区間を経由して供給されていた区域は、そのままでは、一時的に供給支障区域となる。例えば、図3.5の区間Wの場合には、A点、B点およびC点の区間スイッチを開放するため、斜線で示された区域が一時的に供給支障区域となる。そこで、この一時的な供給支障区域を、作業区間または事故区間を迂回するルートから供給することにより、早急に解消しなければならない。そのためには、作業区間または事故区間の適当な開放スイッチを仮想的なシンクとし、変圧器の集合をソースとして事故時の負荷切替アルゴリズムを適用する（第6章参照）。すなわち、図3.5に示す区間Wの場合には、B点およびC点を仮想的なシンクとし、変圧器 T_1 、 T_2 および T_3 をソースとするネットワーク（図3.6参照）に対して、事故時の負荷切替アルゴリズムを適用する。

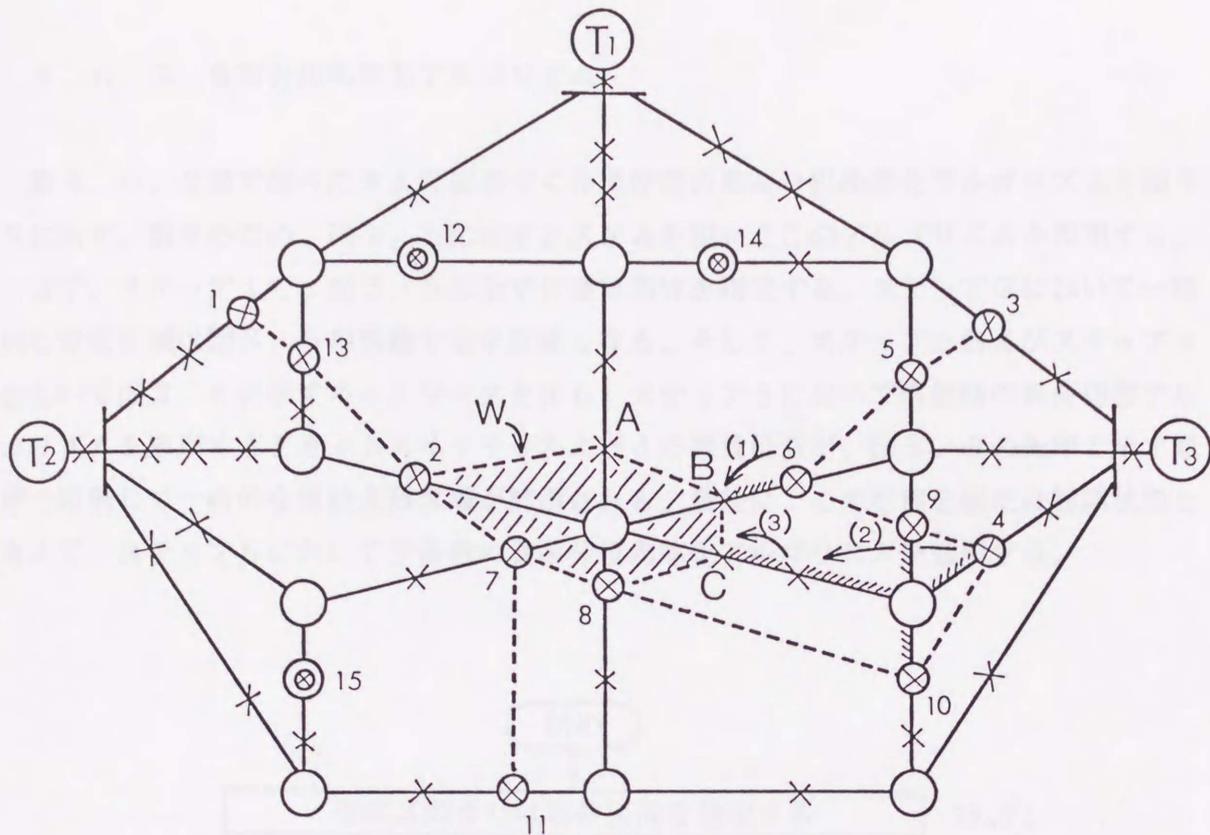


図3.5 作業区間または事故区間と停電区域

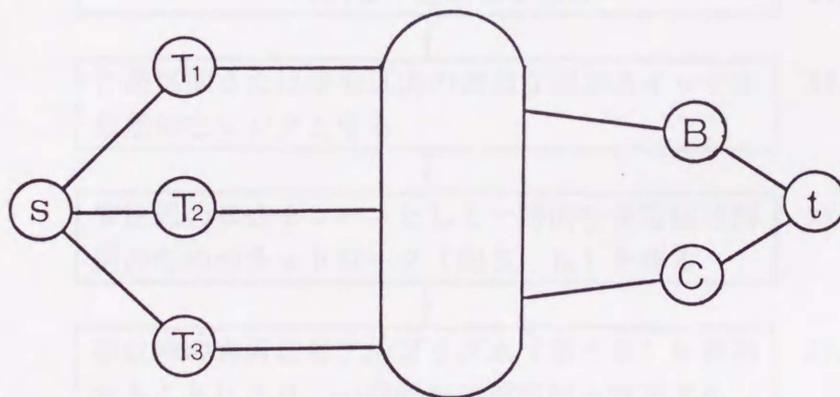


図3.6 供給支障区域解消のためのネットワーク

ここで、図3.6に示すネットワークは図3.2と対応していることに注目しよう。そして t を事故変圧器と考えて、(3.1)式～(3.5)式の制約下で(3.8)式を目的関数とする問題を事故時の負荷切替問題という。

なお、この考え方は複数区間における作業および多重事故の場合にも適用できる。すなわち、このような場合には、図3.5のB点およびC点に相当するスイッチの集合を新たに仮想的なシンクと考えて、図3.6に示すようなネットワークを作ることができるからである。

以上のようにして、一時的な供給支障区域を解消した後で、第3.4節で述べた負荷分担均等化アルゴリズムを適用する。

3.6.3 負荷分担均等化アルゴリズム

第3.6.2節で述べた考え方に基づく作業停電の負荷分担均等化アルゴリズムを図3.7に示す。簡単のため、図3.5に示すシステムを用いてこのアルゴリズムを説明する。

まず、ステップ1で、図3.5に示す作業区間Wを指定する。ステップ2において一時的な停電区域は図3.5の斜線で示す区域となる。そして、ステップ3およびステップ4において図3.6に示すネットワークを作る。ステップ5において事故時の負荷切替アルゴリズムを適用するとカットスイッチ6および4の開放位置が、図3.5の矢印で示す順序で移動して一時的な供給支障区域が解消される。最後に、この状態を新たに初期状態と考えて、ステップ6において平常時の負荷分担均等化アルゴリズムを適用する。

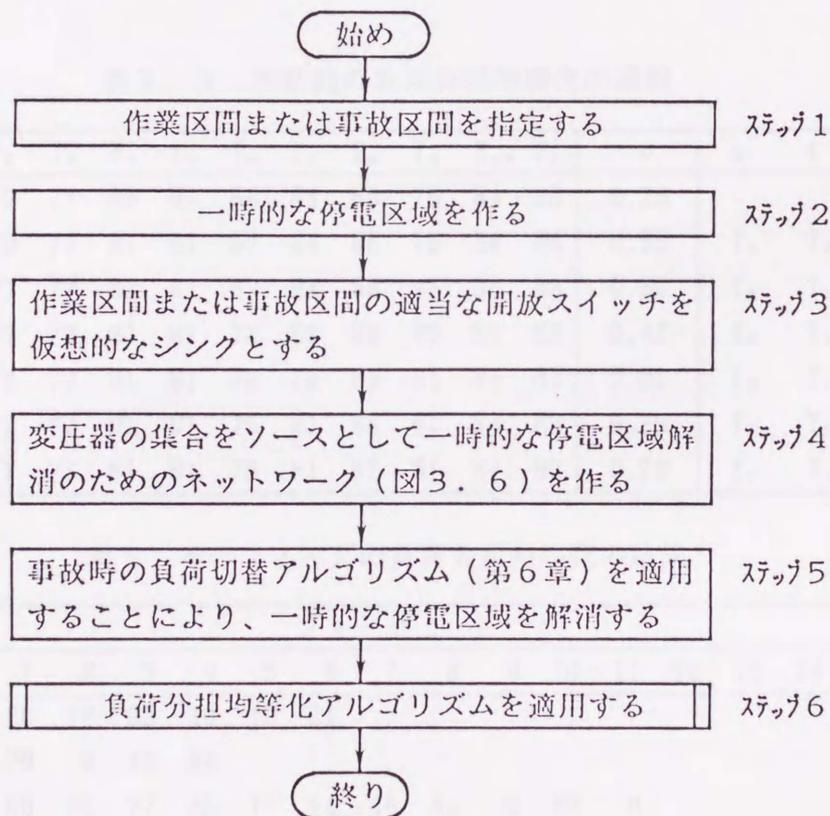


図3.7 作業停電の負荷分担均等化アルゴリズム

3.7 実規模システムの数値例と考察

第3.6.3節で提案したアルゴリズムの妥当性と実用性を評価するために、第2章で説明した実規模システムにこのアルゴリズムを適用する。ここで、このシステムの総負荷が11,633 [A]であり、総供給能力は14,310[A]であるから $r=0.81(=11,633/14,310)$ である。

表3.3は各変圧器の負荷分担均等化の過程を示す。 q は変圧器 s から t への負荷移動量を表す。表中の数値は r_i の百分率を、そして、反復0の数値は初期状態における r_i を示す。

まず、反復1において変圧器 T_6 および T_4 がそれぞれ s および t として選ばれて、75[A]の負荷移動が行われる。その結果、 σ が0.75から0.59へ減少する。このようにして6回の反復で $\sigma=0.28$ となる。終了の判定は適当な ϵ を与えてすべての変圧器 T_i について $|r_i-r|\leq\epsilon$ となるか、または σ が改善されなくなるまでとする。ここでは $\epsilon=0.05$ としている。

表3.3 変圧器の負荷分担均等化の過程

反復	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}	σ	s	t	q [A]
0	86	70	77	85	81	54	84	88	75	84	88	0.75			
1	86	70	77	81	81	67	84	88	75	84	88	0.59	T_6	T_4	75
2	79	77	77	81	81	67	84	88	75	84	88	0.50	T_2	T_1	61
3	79	77	77	81	81	72	82	88	75	84	88	0.42	T_6	T_7	32
4	79	77	77	81	81	72	82	88	81	84	83	0.31	T_9	T_{11}	57
5	79	77	77	81	81	75	81	88	81	84	83	0.29	T_6	T_7	18
6	79	77	77	81	81	75	81	87	81	84	83	0.28	T_7	T_8	7

表3.4 フィーダの負荷分担均等化の結果

変圧器	β^1	フィーダ														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
T_1	26	26	18	33	40	19	21									
T_2	38	79	0	40	34											
T_3	31	68	25	77	25	17	14	46	46	0	20	0				
T_4	36	57	68	0	38	47	24	37	31	16	38					
T_5	27	35	43	5	36	23	18									
T_6	25	21	47	20	11											
T_7	30	24	31	22	15	37	65	2	41	31						
T_8	30	14	56	60	23	19	37	34	49	0	58	45	16	17	15	0
T_9	27	36	9	18	32	36	30									
T_{10}	34	29	24	35	64	24	28									
T_{11}	22	0	27	14	16	64	21	12	29	24	10					

次に、表3.4は各変圧器に接続するフィーダの負荷分担均等化の結果を示す。表中の数値は β_i の百分率を示す。簡単のため反復の過程は省略して最終結果のみを示す。

また、表3.4の結果を用いて、図3.3のステップ8によってステップ1へ戻って再び変圧器の負荷分担の均等化を行っているが、カットスイッチの開放位置の移動がないので終了する。

なお、表3.4に示すように負荷が0となっているフィーダが存在する。この結果は、ループスイッチの開放位置を移動すると負荷分担の不均等がより大きくなることを示している。本計算に要するCPU時間はHITAC M200H計算機で2.2秒であり、実用上十分であることが分かる。

次に、作業停電の負荷分担均等化アルゴリズムを、図3.5に示すWのような、五つの作業区間に適用してみたところ、CPU時間は3.1~3.6であり、実用上十分であることが分かった。

以上の結果は、本論文で提案するアルゴリズムの妥当性および実用性を検証している。

3.8 まとめ

本章では平常時における変圧器およびフィーダの負荷分担均等化の組織的で実用的な計算方法を提案した。まず、二つの変圧器間の負荷分担均等化の問題が、ソースとシンクをもつネットワークフロー問題として定式化できることを示した。そして、このネットワークフロー問題を、部分和問題の近似解法を応用して、解く基本的な計算方法を提案した。次に、すべての変圧器およびフィーダの負荷分担均等化を同時に行うと解法が困難となるので、負荷分担が最も不均等な二つの変圧器およびフィーダに、この基本的な計算を繰返し適用して全システムの負荷分担を均等化する負荷分担均等化アルゴリズムを提案した。更に、この平常時の負荷分担均等化の考え方は、保守作業区間がシステムから除去された状態を改めて平常時と見なせば、異常時の保守状態のシステムにも適用できることを示した。最後に、ここで提案している負荷分担均等化のアルゴリズムを第2章で説明した実規模システムに適用することにより、本アルゴリズムの妥当性と実用性を検証した。

第 4 章

制約がない場合の区間負荷測定

第4章 制約がない場合の区間負荷測定

4.1 概要

近年、配電システムの自動化の進展に伴い、第3章で述べた負荷分担均等化をはじめとして、図1.2に示したような目的でスイッチ・オペレーションに関する研究が行われ多数のアルゴリズムが開発されてきている。このスイッチ・オペレーションの問題は、多くの場合、組合せ最適化問題として定式化されるため、区間負荷の大きさが重要である。従って、正確な区間負荷が測定されていなければいかに厳密な解法を用いてこれらの問題を解いても得られた結果は正確なものとはなり得ない。

このように、配電システムの自動化の進展に伴い区間負荷は基礎的なデータとして不可欠になってきている。しかしながら、現状では需要家の契約電流からフィーダ電流の按分により区間負荷を推定するか、あるいは必要に応じてカセット・テープレコーダを用いて、特定季節、特定時間帯の負荷を計測記録し⁽⁴⁾、それによってより実際に近い区間負荷を推定しているにすぎない。また、これらの方法では多くの費用と時間を要する。各区間負荷を正確に測定するためには、各区間スイッチ位置に変流器を設備し、一定時刻毎に電流値を遠方監視制御装置を介して収集すればよい。しかし、この方法は膨大な費用を要するため、現状ではまだ設備がなされる機運にない。

本章では、配電システムが急速に自動化されてきつつあることに着目し、区間スイッチの遠隔操作によるフィーダ間の負荷切替時のフィーダ電流の変化を利用して区間負荷を測定する方法を提案する^{(26)~(29)}。すなわち、簡単のため変圧器およびフィーダに十分余裕があるとして、グラフに基づき負荷測定に対する基本的な考え方を述べる。しかし、容量が十分にあって測定を組織的に行わないと、区間負荷を測定できない場合がある。更に、本負荷測定方法の有効性および実用性を第2章で説明した実規模システムのデータを用いて検証している。

なお、システムは一時的に閉ループ運用が可能であると仮定する。また、本章においては、フィーダ間の負荷切替が負荷測定の本質的な役割をしているので、フィーダ引出口を根とする根付き木を採用している。

4.2 区間負荷測定のお考え方

4.2.1 区間負荷測定のお概念

第2章で述べたように、常時開放形ループ配電システムにおける区間スイッチを計算機を介して開閉操作するためにはグラフ表現が最も適している。区間負荷測定においても測定方法を組織的なものとするためグラフ理論のお考え方を導入している⁽³⁰⁾⁽³¹⁾。グラフと対応させるため、樹枝状システムを各フィーダ引出口を根とする根付き木と考える⁽³²⁾、開放スイッチを葉に対応させている。また、カットスイッチの集合をカットと呼ぶことにする。

ここでは、区間負荷測定のお概念を容易に理解できるように、図4.1に示すモデルシステムを考えるとよい。いま、図4.1に示すシステムにおいて各フィーダ($F_1 \sim F_4$)引出口に根($R_1 \sim R_4$)を割当てた状態およびカットを図4.2に示す。

本章で提案する区間負荷測定のお基本的な考え方は、カットスイッチの開放位置を変更したときの二フィーダ間の負荷移動量を各フィーダ引出口に設置された電流計で読取ることである。すなわち、フィーダの供給区域を分離するカットスイッチが中心的な役割を演じる。例えば、測定区間が与えられた場合、開放スイッチの開放位置を変更する際にシステム内に閉ループを作らないという制約の下で、その区間を含むようなカットを構成することが目的となる。このとき、カットを直接構成することができないならば、カットスイッチおよびループスイッチの開放位置を変更する手続きが必要となる。以下で提案するアルゴリズムではグラフ理論のお考え方をを用いているので、この開放位置の変更手続きを開放スイッチ(葉)の探索問題と考えると、組織的なアルゴリズムを構築している。

例えば、図4.2において、カットスイッチ4の開放位置をE点からD点へ変更したとすれば、区間(D, E)の負荷はフィーダ F_1 の引出口電流の減少分またはフィーダ F_3 の引出口電流の増加分として測定できる。また、ループスイッチ3の開放位置をG点からF点へ変更しても、フィーダ F_1 の引出口電流が変化しないため、区間(F, G)の負荷を測定することはできない。そこで、例えばカットスイッチ4の開放位置をC点へ変更することにより、区間(F, G)を含むようなカットを構成した後で、すなわち、ループスイッチ3をカットスイッチにタイプ変更した後で、上述の開放位置の変更を行えば区間(F, G)の負荷測定は完了する。

以上をまとめれば、カットスイッチの開放位置を変更すれば対応するフィーダの供給区域が変化するので、フィーダ引出口に設置されている電流計により区間負荷が測定できる。

従って、次の性質が得られる。

〔性質1〕 測定区間を含むブランチの上にカットスイッチが存在すれば、その区間の負荷はカットスイッチの開放位置の変更により測定可能である。

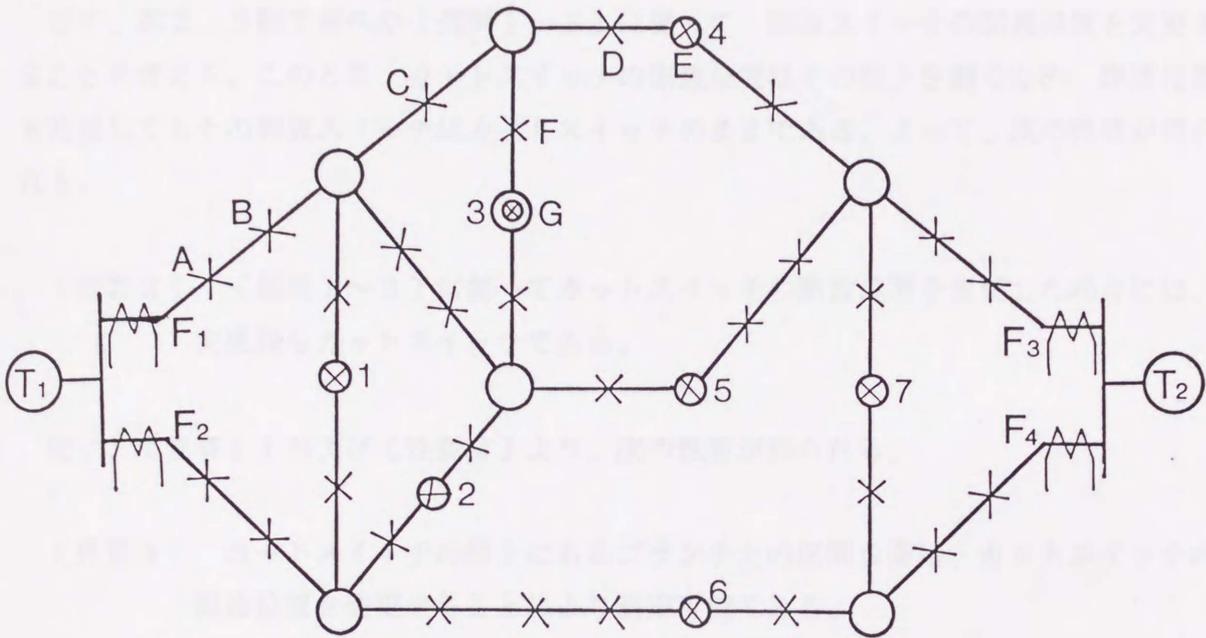


図4. 1 区間負荷測定モデルシステム

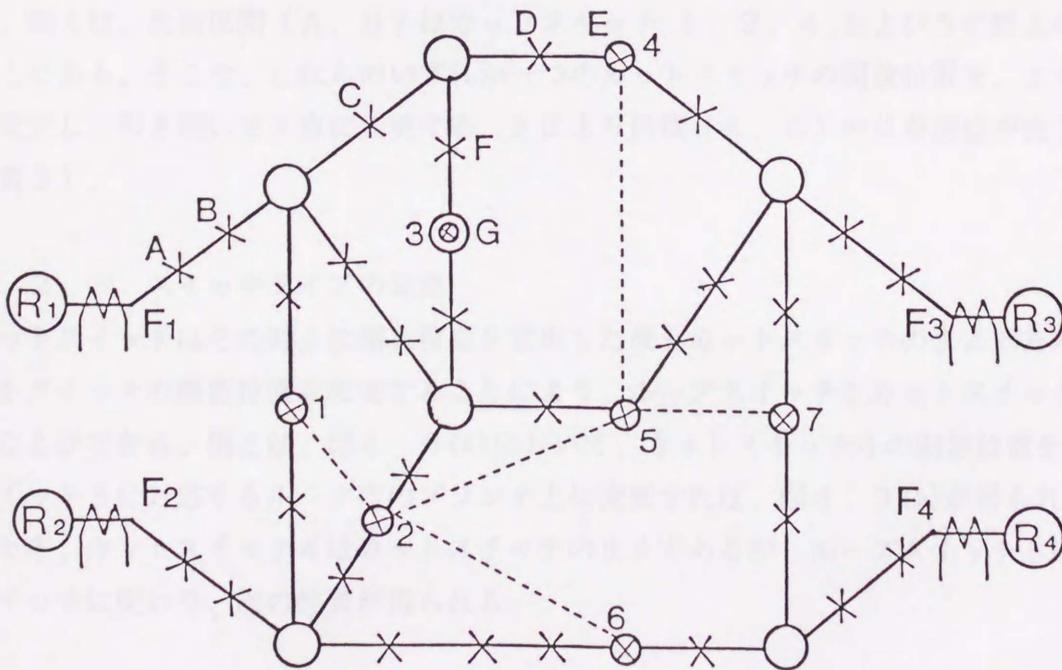


図4. 2 根の割当てとカット

4. 2. 2 区間スイッチの開放位置変更

以下では、測定区間を含むブランチの上にカットスイッチが存在しない場合を考える。この場合には、開放スイッチの開放位置を変更する手続きが必要となるが、常時開放形ループ配電システムに要求される性質を満たすためには、第2. 3節で述べた区間スイッチの開放位置変更規則を守る必要がある。

さて、第2. 3節で述べた〔規則1～3〕に従って、開放スイッチの開放位置を変更することを考える。このとき、カットスイッチの開放位置はその幹上を動くため、開放位置を変更してもその開放スイッチはカットスイッチのままである。よって、次の性質が得られる。

〔性質2〕 〔規則1～3〕に従ってカットスイッチの開放位置を変更した場合には、変更後もカットスイッチである。

更に、〔性質1〕および〔性質2〕より、次の性質が得られる。

〔性質3〕 カットスイッチの幹上にあるブランチ上の区間負荷は、カットスイッチの開放位置を変更することにより測定可能である。

例えば、図4. 2に示すシステムにおいてカットスイッチ4の開放位置を、その幹上に沿ってD点、C点、B点そしてA点に変更する限りカットスイッチである（性質2）。そして、例えば、負荷区間（A，B）はカットスイッチ1，2，4 および5の幹上のブランチ上にある。そこで、これらのいずれか一つのカットスイッチの開放位置を、まず、B点に変更し、引き続いてA点に変更することにより区間（A，B）の負荷測定が完了する（性質3）。

4. 2. 3 スイッチタイプの変更

カットスイッチはその幹上に開放位置を変更した後もカットスイッチのままであるが、カットスイッチの開放位置を変更することにより、ループスイッチをカットスイッチに変えることができる。例えば、図4. 3(a)において、カットスイッチ4の開放位置をループスイッチ3に対応するループ内のブランチ上に変更すれば、図4. 3(b)が得られる。このとき、カットスイッチ4はカットスイッチのままであるが、ループスイッチ3はカットスイッチに変わり、次の性質が得られる。

〔性質4〕 カットスイッチの開放位置がループスイッチが切っているループ内に変更されれば、そのループスイッチはカットスイッチに変わる。

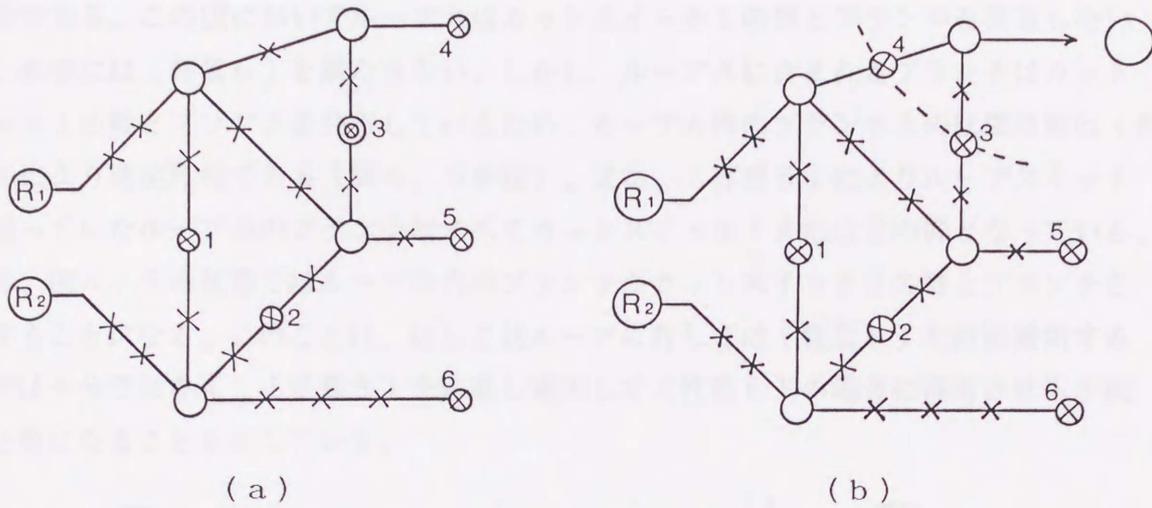


図4.3 スイッチタイプの変化

図4.3から明らかなように、ループスイッチ3によって切られていたループ内のブランチは、カットスイッチ4の開放位置の変更によりカットスイッチに対する幹上のブランチとなる。性質として表せば、以下となる。

〔性質5〕 カットスイッチの開放位置がループスイッチが切っているループ内に変更されれば、そのループスイッチによって切られていたループ内のブランチはカットスイッチに対する幹となる。

カットスイッチの開放位置をループ内に変更するためには、カットスイッチの幹とループがブランチを共有することが必要であるから、〔性質3～5〕によりループ内のブランチに対する測定可能性に関する性質が得られる。

〔性質6〕 ループスイッチによって切られているループ内のブランチが、カットスイッチに対する幹とブランチを共有するならば、そのループ内のブランチ上の区間負荷はカットスイッチの開放位置の変更により測定可能である。

4. 2. 4 はしご状ループ

はしご状ループとは、図4. 4に示すように幾つかのループがはしご状につながっている場合である。この図においてループBはカットスイッチ1の幹とブランチを共有しないため、直接には〔性質6〕を満たさない。しかし、ループAに含まれるブランチはカットスイッチ1の幹とブランチを共有しているため、ループA内のブランチ上の区間負荷は〔性質6〕により測定可能である（図4. 5参照）。また、〔性質5〕によりループスイッチ2が切っていたループ内のブランチはすべてカットスイッチ1または2の幹となっている。従って、図4. 5の状態ではループB内のブランチがカットスイッチ2の幹とブランチを共有することになる。このことは、はしご状ループに対しては〔性質6〕を直接適用するだけでは十分ではなく、〔性質5〕を繰返し適用して〔性質6〕の場合に帰着させる手続きが必要になることを示している。

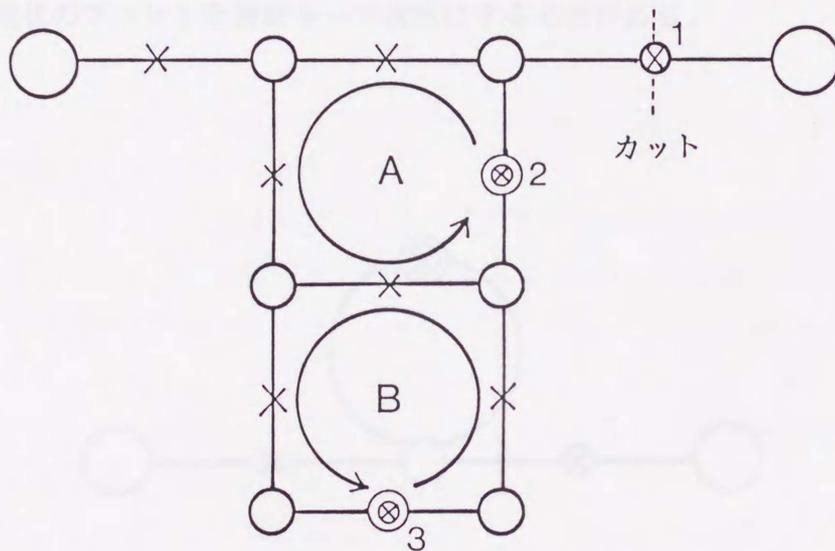


図4. 4 はしご状ループの例

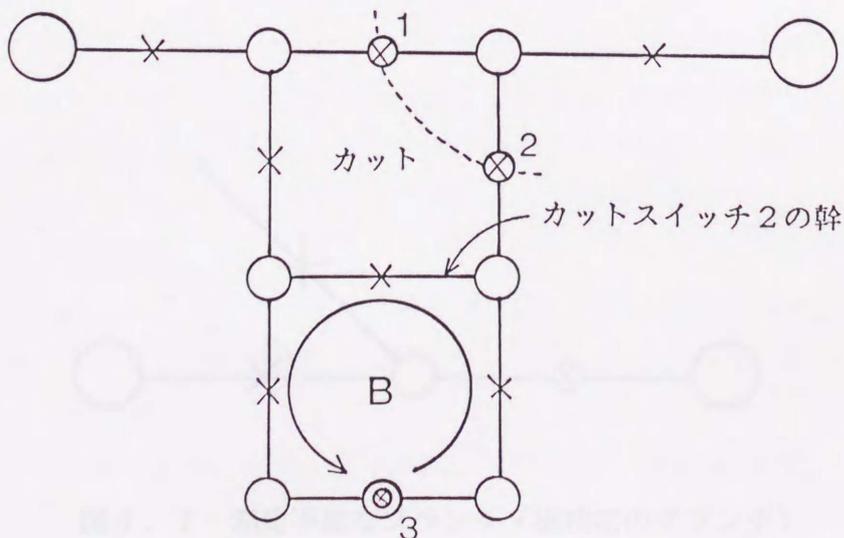


図4. 5 開放位置の変更（はしご状ループ）

4. 2. 5 測定不能な区間負荷

ここまでは測定可能なブランチに対する性質を考えたが、以下では測定不能なブランチを持つ性質について述べる。測定不能なブランチに対しては、〔性質3～6〕より次の性質が導かれる。

〔性質7〕 カットスイッチに対する幹に含まれないブランチで、かつ、〔性質5〕を繰返し適用しても〔性質6〕の場合に帰着できないようなブランチ上の区間負荷は測定できない。

図4. 6および図4. 7に測定不能なブランチの例を示す。このようなブランチに対しては、フィーダ上に電流計を設置するだけでは不十分であり、閉ループ内に電流計を設置するか、樹枝状のブランチを開放ループ構成にする必要がある。

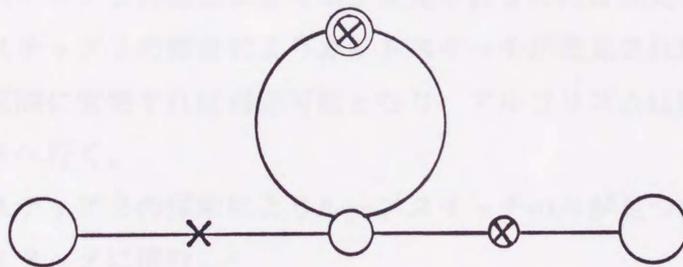


図4. 6 測定不能なブランチ（閉ループ）

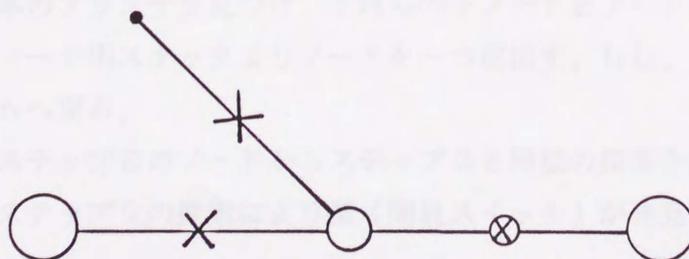


図4. 7 測定不能なブランチ（樹枝状のブランチ）

4.3 区間負荷測定のアプローチ

4.3.1 任意区間の負荷測定

これまでに述べたことを用いて、測定しようとする区間が与えられた場合に、どのように開放スイッチの開放位置を変更すれば、与えられた区間の負荷が測定できるかを見つけるアプローチを以下に示す。カットスイッチが直接に求まらない場合には、カットスイッチの探索を繰り返す必要があるため、このアプローチではスタック⁽³³⁾を用いて繰り返しを制御している。

(1) アプローチ Section

【ステップ1】与えられた測定区間を含むブランチを求め、そのブランチの子ノードを見つける。

【ステップ2】ステップ1で得られた子ノードから適当な探索方法を用いて木の末端側へ向けて葉（開放スイッチ）の探索を行う。

【ステップ3】ステップ2の探索により葉が発見されなければ測定不能である。

【ステップ4】ステップ2の探索によりカットスイッチが発見されれば、そのスイッチの開放位置を測定区間に変更すれば測定可能となり、アプローチは終了する。そうでなければ、ステップ5へ行く。

【ステップ5】ステップ2の探索によりループスイッチのみが見つければ、それらのスイッチをスイッチ用スタックに積む。

【ステップ6】スイッチ用スタックからループスイッチを一つ取出す。もし、スイッチ用スタックが空ならば測定不能として、アプローチは終了する。そうでなければ、ステップ7へ行く。

【ステップ7】ステップ6のループスイッチが切っているループを求め、そのループ内で最も根に近いノードを見つける。また、着目しているループ内のブランチでそのノードに直接接続する2本のブランチを見つけ、それらの子ノードをノード用スタックに積む。

【ステップ8】ノード用スタックよりノードを一つ取出す。もし、ノード用スタックが空ならばステップ6へ戻る。

【ステップ9】ステップ8のノードからステップ2と同様の探索を行う。

【ステップ10】ステップ9の探索により葉（開放スイッチ）が発見されなければステップ8へ戻る。

【ステップ11】ステップ9の探索によりカットスイッチが発見されれば、そのスイッチの開放位置をステップ7のループ内に変更する。このとき、ループスイッチがカットスイッチに変わる。そこで、それまでの探索順序を逆にたどり、ループスイッチを次々とカット

スイッチに変えていけば、測定区間を含むカットができるのでアルゴリズムは終了する。
 【ステップ12】ステップ9の探索により未発見のループスイッチが見つければ、それらのスイッチをスイッチ用スタックに積みステップ6へ戻る。そうでなければ、そのままステップ8へ戻る。

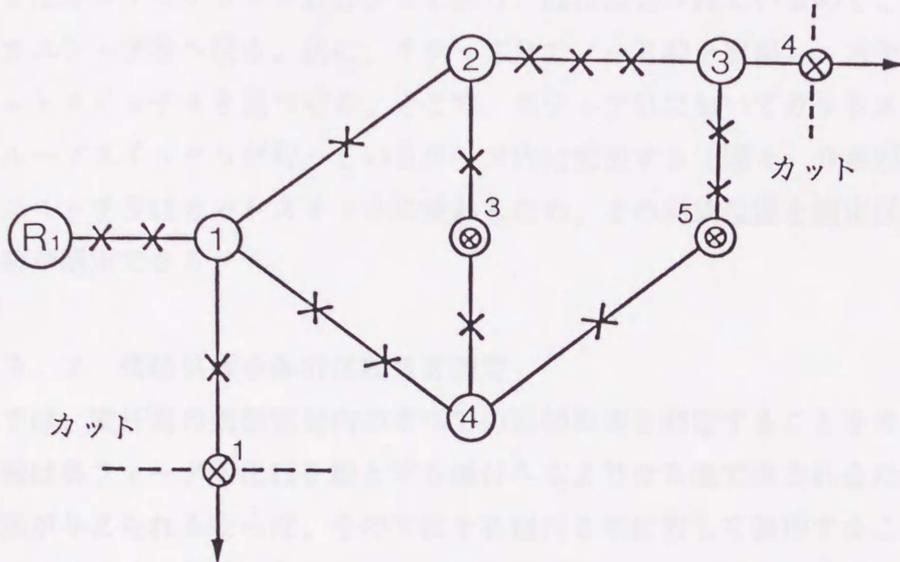


図4. 8 アルゴリズム Section のモデルシステム

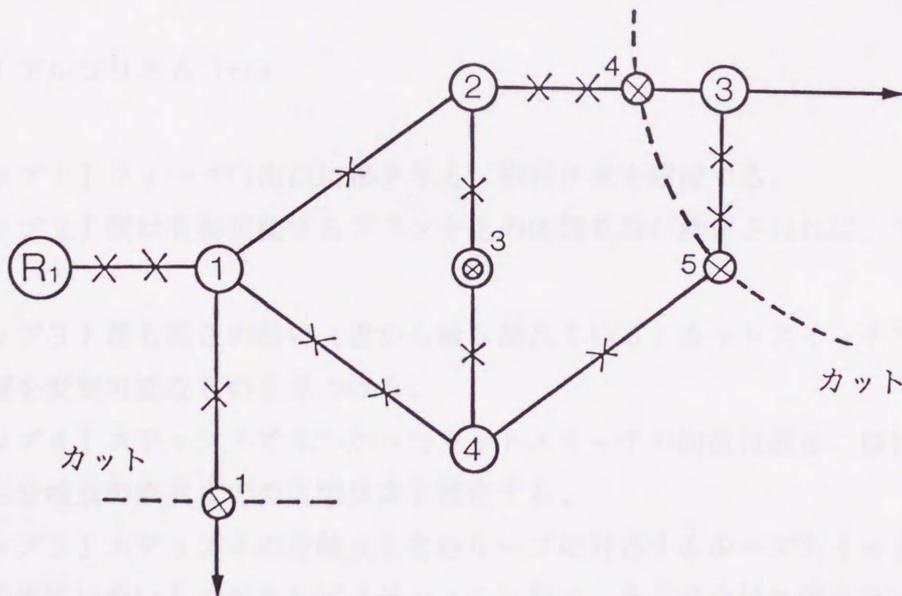


図4. 9 開放位置の変更(アルゴリズム Section)

上述のアルゴリズムを図4. 8に示されるモデルシステムを用いて説明しよう。ここでは、ノード#1-#4間のブランチ上の負荷を測定することを考える。まず、ステップ1では子ノード#4が見つかる。次に、ステップ2の探索によりループスイッチ3および5を得る。ここで見つかったスイッチはすべてループスイッチであるので、ステップ5でそれらをス

イッチ用スタックに積む。ステップ6でループスイッチ5を取出し、ステップ7でループスイッチ5が切っているループ(#1-#2-#3-#4)を見つける。そこで、最も根に近いノードとしてノード#1が求まり、子ノード#2および#4をノード用スタックに積む。次に、ステップ8でノード#4を取出し、ステップ9でノード#4からの探索を行う。このとき発見されるスイッチはループスイッチ3および5であり、既に探索されているので、ステップ12よりそのままステップ8へ戻る。次に、ステップ8でノード#2を取出し、ステップ9の探索によりカットスイッチ4を見つける。そこで、ステップ11においてカットスイッチ4の開放位置をループスイッチ5が切っているループ内に変更する(図4.9参照)。このとき、ループスイッチ5はカットスイッチに変わるため、その開放位置を測定区間に変更すれば区間負荷が測定できる。

4.3.2 供給区域全体の区間負荷測定

以下では、変圧器の供給区域内のすべての区間負荷を測定することを考える。変圧器の供給区域は各フィーダ引出口を根とする根付き木よりなる森で表されるため、根付き木の測定方法が与えられるならば、その方法を各根付き木に対して適用することにより変圧器の供給区域はすべて測定できる。そこで、以下ではフィーダ引出口を根とする根付き木全体の区間負荷を測定するアルゴリズムを考える。

(2) アルゴリズム Tree

【ステップ1】フィーダ引出口に根を与え、根付き木を構成する。

【ステップ2】根に直接接続するブランチ上の区間負荷が測定されれば、手続きを終了する。

【ステップ3】最も高さの高い(根から最も離れている)カットスイッチで、根の方向に開放位置を変更可能なものを見つける。

【ステップ4】ステップ3で見つかったカットスイッチの開放位置を、根に向かって変更しながら分岐点の直前までの区間負荷を測定する。

【ステップ5】ステップ4の分岐点を含むループに対応するループスイッチで、分岐点の直前まで来ていないものがあればステップ6へ行く。そうでなければステップ7へ行く。

【ステップ6】ステップ5で見つかったすべてのループスイッチの開放位置をステップ4の分岐点の直前に変更する。

【ステップ7】分岐点の幹以外のすべてのブランチ上にスイッチが集まればステップ8へ行く。そうでなければステップ3へ戻る。

【ステップ8】カットスイッチの開放位置を分岐点の幹上に変更し、分岐点の周りの区間負荷を測定した後、ステップ2へ戻る。

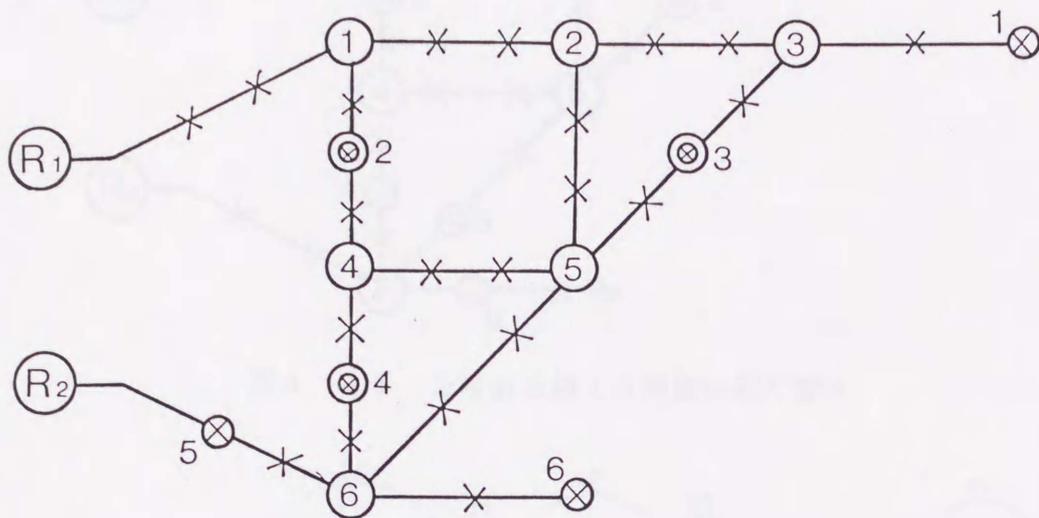


図4. 10 アルゴリズム Tree のモデルシステム

上述のアルゴリズムを具体的な例を用いて説明しよう。図4. 10において、根R₁に対応する根付き木全体の区間負荷を測定することを考える。このアルゴリズムは根付き木の大きさを順次縮小しているため、ステップ2において根に直接接続するブランチ（フィーダ）の負荷が測定されれば、根付き木全体の区間負荷が測定されている。この例では、ステップ3で最も高さの高いカットスイッチとしてカットスイッチ5および6が見つかる。ここでは、カットスイッチ5を選んだとしよう。ステップ4ではカットスイッチ5の開放位置をノード#6の直前まで変更する。次に、ステップ5でループスイッチ4を見つけ、ステップ6でループスイッチ4の開放位置をノード#6の直前に変更する。ステップ7では、カットスイッチ6がまだ分岐点の直前に来ていないのでステップ3へ戻り、ステップ4でカットスイッチ6の開放位置をノード#6の直前まで変更する。

この状態で、すべての開放スイッチがノード#6の周りに集まったので、ステップ8でカットスイッチの開放位置をノード#6を越えて幹上に変更する。カットスイッチ5の開放位置を変更した場合を図4. 11に示す。この例では、ステップ8でノード#6を越えることが可能なカットスイッチは5および6の二つがあるが、〔性質2〕より分岐点を越えてもカットスイッチのままであるので、どちらを選んでもかまわない。また、図4. 11の状態では開放スイッチ4はカットスイッチに変わっている。そこで、次の繰返しではステップ3でカットスイッチ4を選び、ノード#4の直前までその開放位置を変更していく。以下、同様の手続きを繰返す。この様子を図4. 12に示しておく。

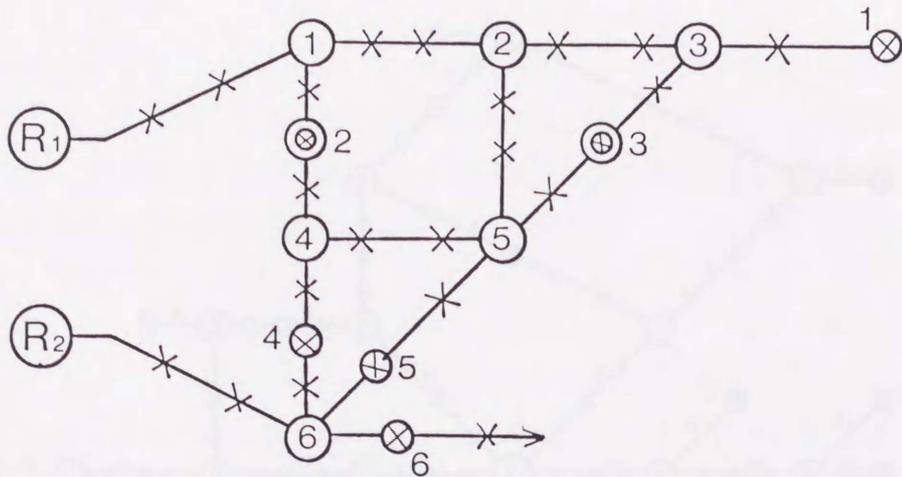


図4. 1 1 分岐点を越える開放位置の変更

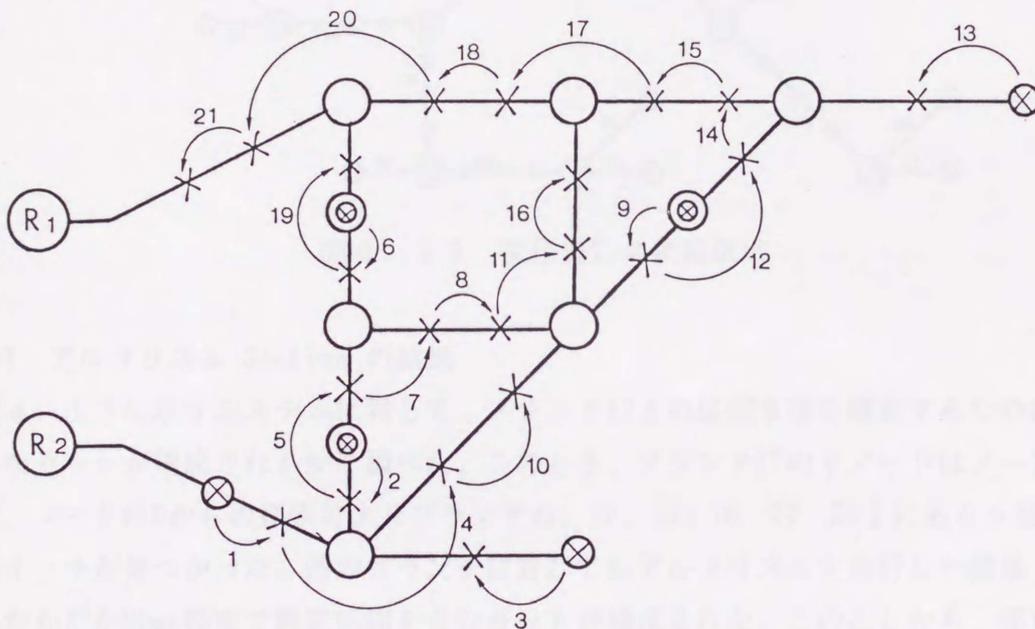


図4. 1 2 根付き木の測定順序

4. 4 適用例と考察

以上で提案した区間負荷の測定方法の有効性を検証するため、第2章で説明した実規模システムに対して広島大学総合情報処理センターのHITACHI M-200H上で計算機実験を行った。以下では、簡単のため、図4. 1 3に示される変電所Aの変圧器 T_1 について説明する。この図は、変圧器 T_1 接続しているすべてのフィーダの供給区域を簡潔に表現したものである。すなわち、複雑さを避けるために投入スイッチは省略し、開放スイッチのみを表現している。また、分岐点およびブランチ上の数字はそれぞれ、分岐点番号およびブランチ番号を示している。

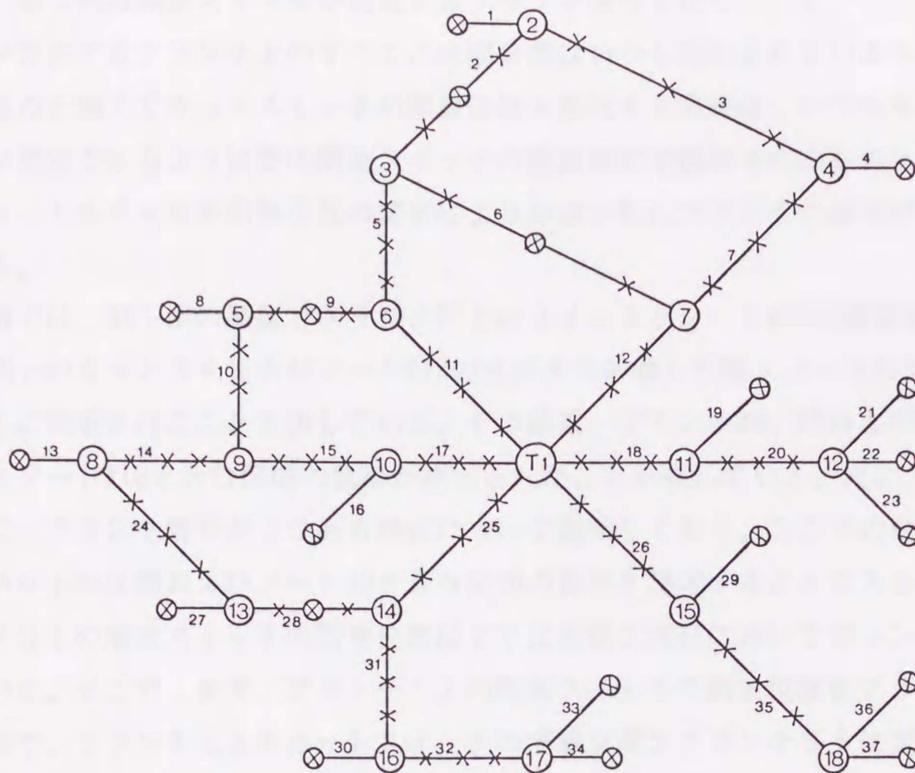


図4. 13 変圧器 T_1 の供給区域

(a) アルゴリズム Section の結果

図4. 13に示すシステムに対して、ブランチ17上の区間負荷を測定するために、どのようなカットが構成されるかを調べた。このとき、ブランチ17の子ノードはノード#10であり、ノード#10からの探索によりブランチ8, 9, 13, 16, 27, 28上にある6個のカットスイッチが見つかった。他のブランチに対してもアルゴリズムを実行した結果、計算時間はたかだか30ms程度で測定区間を含むカットが構成された。このことから、都市部の配電システムは緊密に連係しているため比較的容易にカットが構成されることが分かる。なお、本数値計算で用いたアルゴリズムでは、ステップ2の探索方法として幅優先探索を用いたが、ノードからの探索によりスイッチが見つかるならば、どのような探索方法を用いてもよい。

(b) アルゴリズム Tree の結果

アルゴリズムを図4. 13に示すシステムの変圧器 T_1 に接続しているすべてのフィーダに対して実行した結果を表4. 1に示す。ここで、第1列は反復回数であり、反復0回目は開放スイッチの初期開放位置をブランチ番号で示している。ただし、複雑さを避けるため、開放位置が変更されなかった開放スイッチは省略している。例えば、ブランチ13上の開放スイッチは、開放位置が移動することなく測定が終了したので、この表中では省略し

である。第2列は開放スイッチが位置するブランチ番号を表している。ここで、カットスイッチが存在するブランチ上のすべての区間負荷はいつも測定されているものとする。また、分岐点を越えてカットスイッチの開放位置を変更する場合は、いつもその分岐点区間の負荷が測定できるように他の開放スイッチの開放位置が調整されるものとしている。第3列はカットスイッチの開放位置の変更により測定されたブランチの番号および分岐点番号である。

この例では、第1回の反復でブランチ27上のスイッチがノード#13の直前に移動し、ブランチ28上のカットスイッチがノード#13の直前まで移動した後、ノード#13を越え、ブランチ24上に変更されたことを表している。その結果、ブランチ28、27および24上のすべての区間とノード#13を含む区間の負荷が測定されたことを表している。次に、反復5回目のように、ブランチ番号が二つある場合について説明しておく。ここでの目的はブランチ5および6上の区間およびノード#3を含む区間の負荷を測定することである。このとき、ブランチ2上の開放スイッチの開放位置はすでに反復2回目においてブランチ3上に変更されている。そこで、まず、ブランチ1上の開放スイッチの開放位置をブランチ2上に移動した後で、ブランチ6上のカットスイッチの開放位置をブランチ5上に変更する必要がある。以上のようにして、17回の反復ですべての区間負荷測定が終了する。

他の変圧器に対しても本アルゴリズムを実行したところ、計算時間はたかだか 2.5秒程度で変圧器全体の区間負荷を測定できることが分かった。

表4. 1 アルゴリズム Tree による測定過程

反復	開放スイッチの位置するブランチ番号														測定されたブランチおよび分岐点番号			
	1	2	4	6	8	9	19	28	27	30	33	36	22					
0																		
1								24									28 27 24	#13
2		3															1 2 3	#2
3						10											8 9 10	#5
4								14									13 14	#8
5	2			5													5 6	#3
6						15											15	#9
7				11	9												11	#6
8						17											16 17	#10
9											32						34 33 32	#17
10			7														4 7	#4
11														20			21 22 23 20	#12
12									31								30 31	#16
13												35					37 36 35	#18
14	6	12															12	#7
15							18										19 18	#11
16									28 25								25	#14
17												26					29 26	#15

4.5 まとめ

本章では、変圧器およびフィーダに十分余裕があると仮定して、グラフに基づく区間負荷測定の基本計算方法を提案した。まず、区間負荷測定においては、フィーダ間の供給区域を分離しているカットスイッチが中心的な役割を果たすことを述べた。すなわち、まず、任意区間の負荷測定は、その区間から木の末端のカットスイッチ（葉）の探索に帰着されることを示した。次に、変圧器の供給区域内のすべての区間の負荷測定は、その変圧器に接続しているすべてのフィーダ上のすべての区間の負荷測定と同じであるので、フィーダ引出口を根とする根付き木を順次縮小することにより組織的に負荷測定ができることを述べた。最後に、ここで提案している二通りの負荷測定アルゴリズムをソフトウェアとして具体化して実規模システムに適用することにより、本アルゴリズムの妥当性と有効性を検証した。

第 5 章

制約がある場合の区間負荷測定

第5章 制約がある場合の区間負荷測定

5.1 概要

第4章においては、変圧器およびフィーダに十分余裕があるとして、グラフに基づく区間負荷測定の基本的な手順を与えた。すなわち、単に、負荷測定の理論的根拠を明らかにすることだけを目的としたため、開放スイッチの開放位置の変更にあたっては電圧降下または容量制約等を考慮していない。そのため、実運用上不可能な操作が含まれることがあるなど、そのままでは実用化が困難なものにすぎなかった。

そこで、本章ではこの基本的な手順に電圧降下および容量制約を考慮した、より実用的な区間負荷測定方法を提案している^{(34)~(39)}。すなわち、区間負荷測定途中において、現時点で大まかに予測されている区間負荷を用いて計算された電圧降下および線路電流に制約違反が発生するような場合には、他フィーダからの応援によって違反を事前に解消しながら区間負荷測定を行い、正確な区間負荷を得る方法である。本問題は、一見、簡単なように思えるが、本質的には複雑な組合せ計画問題になっているので、解法に工夫を必要としている。本章では有効勾配法⁽⁴⁰⁾の概念を用いた近似解法によって実用的な演算時間内で近似解を得る方法について提案している（付録1参照）。

本章では、まず、制約がある場合の区間負荷測定問題の具体的な記述を行い、制約違反の取扱い方法を述べる。次に、一フィーダ上のすべての区間および任意の一区間の負荷測定方法について説明する。更に、モデルシステムおよび実規模システムにおける数値例により、ここで提案している解法の有効性および実用性を示している。

なお、各区間負荷はすべて定電流特性と仮定している。また、本章においても、フィーダ間の負荷切替が負荷測定の本質的な役割をしているので、フィーダ引出口を根とする根付き木を採用している。

5.2 問題の説明

区間負荷の測定は以下に述べる四種類に分けて考えることができる。各々の説明を容易にするため、図5.1に示すモデルシステムを用いよう。

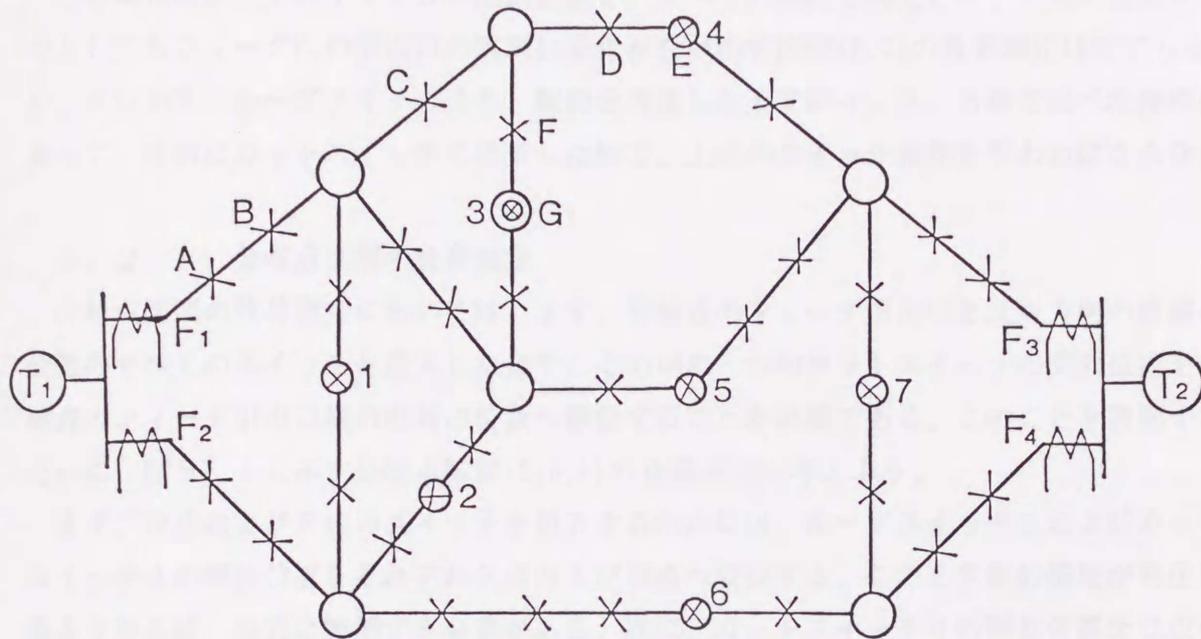


図5.1 制約付き区間負荷測定モデルシステム

5.2.1 基本的な区間負荷測定

基本的な区間負荷測定を説明するために、図5.1に示すシステムの区間(D,E)のような、任意区間の負荷測定を考えよう。

さて、区間(D,E)の負荷を測定するためには、カットスイッチ4の開放位置を、一旦ループを構成して、E点からD点へ変更すればよい。すなわち、フィーダF₁およびF₃の引出口の電流変化により区間負荷が分かり、区間(D,E)を停電させることなく、測定は完了する。しかしながら、そのとき電圧降下および容量制約違反が発生するようならば、事前に開放スイッチ5, 6または7などの開放位置を変更して、フィーダF₃または変圧器T₂を応援することによって、その違反を解消しておかなければならない。すなわち、この制約違反を事前に解消するためには、関係するフィーダの電圧降下および容量制約下で、違反解消に寄与できる応援スイッチ5, 6または7の開放位置をそれぞれ何区間変更すればよいかという組合せ最適化問題を解けばよい。この組合せ最適化問題は区間負荷計測のためカットスイッチ4の開放位置が移動するとき制約違反が発生するようならば、その都度解かれねばならない。更に、分岐点を越えて開放スイッチの開放位置が移動する場合に、どの開放スイッチの開放位置を移動すべきかという問題が発生する。

5. 2. 2 ループ内の区間負荷測定

ループ内の区間負荷測定を説明するために、図5. 1に示すループスイッチ3のループ内の区間(F,G)の負荷測定を考えよう。

この場合はループスイッチ3の開放位置を、すべての制約を満足して、F点に変更できたとしてもフィーダ F_1 の引出口の電流に変化がないので区間(F,G)の負荷測定は完了しない。すなわち、ループスイッチ3を、制約を考慮した上で第4. 2. 3節で述べた操作によって、事前にカットスイッチに変更した後で、上述のスイッチ操作を行わねばならない。

5. 2. 3 分岐点区間の負荷測定

分岐点区間の負荷測定においては、まず、分岐点のフィーダ引出口と反対方向の直前の位置のすべてのスイッチを投入した後で、その中の一つのカットスイッチの開放位置を分岐点のフィーダ引出口側の直前の位置へ移動することが必要である。このことを説明するために、図5. 1に示す分岐点区間(C,D,F)の負荷測定を考えよう。

まず、D点およびF点のスイッチを投入するためには、ループスイッチ3およびカットスイッチ4の開放位置をそれぞれF点およびD点へ変更する。このとき制約違反が発生するようならば、事前に解消する必要がある。次に、カットスイッチ4の開放位置をC点に移動することができるならば、この分岐点区間(C,D,F)の負荷測定が完了する。

5. 2. 4 一フィーダ全区間の負荷測定

これは、一フィーダ上の個々の区間負荷を連続的に測定することと等価である。例えば、図5. 1に示すフィーダ F_1 上の全区間の負荷測定の場合には、区間(D,E)、(F,G)および(C,D,F)などを、制約を考慮して連続的に測定することである。

この場合には一区間負荷測定における問題に加えて、更に、本質的に測定不能な区間(第4. 2. 5節参照)を除いて未測定区間を生じないこと、および同一区間負荷をできるだけ重複して測定しないこと等も考慮しなければならない。

5. 2. 5 問題の要約

以上に述べたごとをまとめると、区間の負荷測定問題は以下のように要約できる。

電圧降下および容量制約下で、次のような操作を行えばよい。(1)一区間の負荷を測定する場合には、与えられた測定区間のフィーダ引出口と反対側のスイッチ位置まで、カットスイッチの開放位置を変更し、引き続いて、その区間のフィーダ引出口側のスイッチ位置へ開放位置を移動する。(2)一フィーダ上の全区間の負荷を測定する場合には、すべてのカットスイッチ開放位置をフィーダ引出口までその方向へ一区間ずつ切替えて行く。分岐点を越えてスイッチ開放位置を移動する場合には、分岐点区間一区間だけの負荷が測定

可能なようにスイッチ開放位置を調整する。いずれの負荷測定においても、測定途中で制約違反が発生するような場合は、事前に応援のためのスイッチ開放位置の組合せを決定して制約違反を発生しないようにした後に、再びカットスイッチの開放位置の変更を続行する。

なお、制約違反のないフィーダ同士をループにしても制約違反の発生はないものとし、また、異システムループ等、あらかじめ禁止された操作は操作対象としないものと仮定する。更に、本質的に測定不能な区間の他に、制約違反の解消不能のために測定不可能となるケースが考えられる。しかしながら、実際のシステムは単一変圧器事故の場合でも、基本的には他の健全フィーダから応援し得るように設計されていることから、この理由で測定不能となるケースは極めて稀であると考えられる。

5.3 制約の監視点と制約違反量の評価

配電線路にキャパシタがない場合、フィーダの電圧降下はいずれかのスイッチ開放点またはフィーダの末端で最大となるので、末端に仮想の開放スイッチがあるものと仮定すると、各開スイッチの両端で監視すればよい。また、容量制約については、各変圧器、フィーダ引出口および線路経路が変化する地点で監視すれば十分である。

なお、区間スイッチの開放位置を変更したときの各区間の線路電流および電圧降下は、フィーダ電流の按分等で、大雑把に予測された（不正確な）区間負荷の値を用いて行い、測定の完了したものから予測値を測定値に置換えている。

さて、いま、フィーダ F_i の監視点数を n とし、 q 番目の監視点における制限値および現在の監視値（電圧降下または電流値）をそれぞれ b_{iq} および p_{iq} と表すことにしよう。更に、フィーダ F_i の各監視点における現在の電圧降下値または電流値をベクトル表現して

$$P_i = [p_{i1}, \dots, p_{iq}, \dots, p_{in}] \quad (5.1)$$

と表すものとしよう。

例えば、図5.2(a)は $n=2$ と仮定したときのフィーダ F_i に関するベクトル P_i を制約違反がある場合とない場合について、図的に表現した例である。もし、制約違反があるならばベクトル P_i の先端は、 P_i^2 のように、制約領域内には入らない。

ここで、電流と電圧降下を同じ次元で取り扱うために各監視点における制限値でこれらの値を規格化しておく都合がよい。すなわち、 p_{iq}/b_{iq} を新しい p_{iq} と定義する。また、(5.1)式の P_i も新しい p_{iq} を用いて表すことにしよう（図5.2(b)参照）。

更に、現状の電圧降下および電流の制限値に対する余裕を評価するための指標を(5.2)式で定義する。

$$e_i = L_i/Q_i \quad (5.2)$$

すなわち、 e_i は制限値に対する相対的な余裕量を評価する値である。

以下のアルゴリズムにおいて、制約違反の大きさは、(5.1)式のベクトル P_i のノルムを、余裕量の大きさは、(5.2)式の e_i の値を用いて評価している。

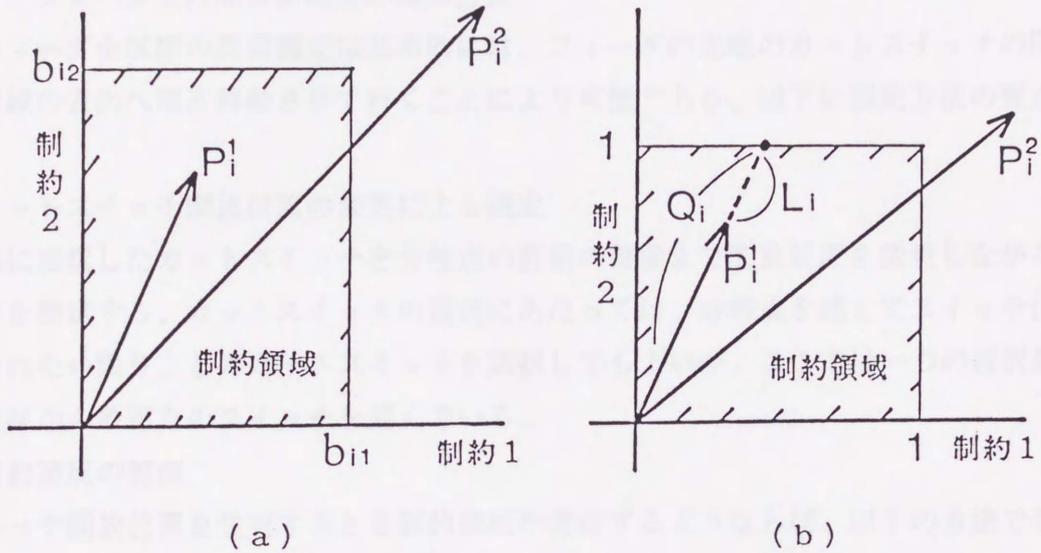


図5.2 現在値のベクトル

5.4 問題の解法アルゴリズム

5.4.1 供給区域全体の区間負荷測定

(a) 一フィーダ全区間負荷測定の基本方針

一フィーダ全区間の負荷測定は基本的には、フィーダの先端のカットスイッチの開放位置を母線方向へ順次移動させて行くことにより可能である。以下に測定方法の要点を述べる。

(i) カットスイッチ開放位置の変更による測定

適当に選択したカットスイッチを分岐点の直前の位置まで開放位置を変更しながら各区間負荷を測定する。カットスイッチの選択にあたっては、分岐点を越えてスイッチ位置が開放されない限り、どのカットスイッチを選択してもよいが、ここでは一つの選択基準として母線から最遠方のスイッチを選んでいく。

(ii) 制約違反の解消

スイッチ開放位置を変更するとき制約違反が発生するようならば、以下の方法で事前に制約違反が発生しないようにシステム構成を変更してから、測定のためのカットスイッチの開放位置を変更する。

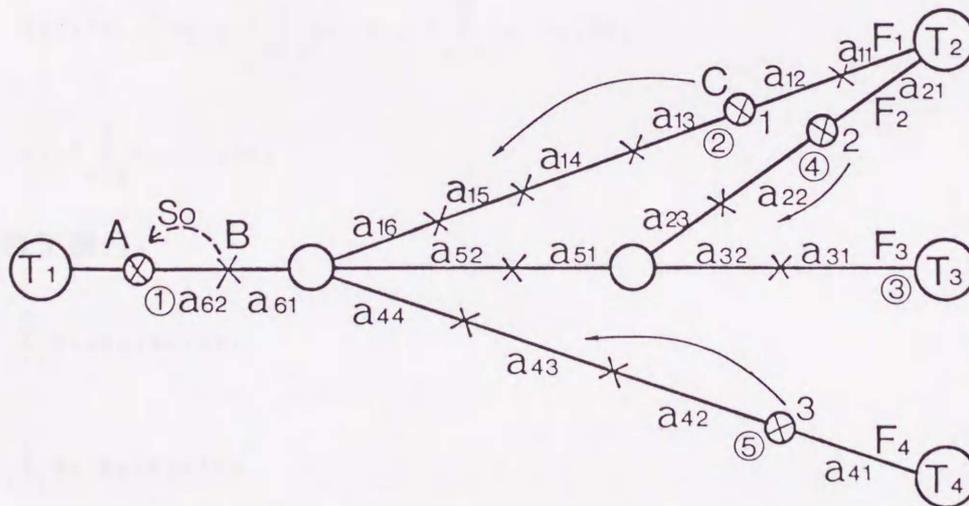


図5.3 制約違反の解消

制約違反の解消は、例を用いて説明したほうが理解し易いので図5.3に示すシステムを用いよう。いま、図5.3でスイッチ S_0 をB点からA点に切替えるとフィーダ F_3 の5箇所の監視点の中で、①A点の電圧降下、②C点の電圧降下、および③フィーダ引出口電流量に制約違反が発生するものと仮定しよう。その場合、応援フィーダ側に新しい制約違

反を生じないように、スイッチ1, 2および3の開放位置を変更してフィーダ F_3 の制約違反を事前に解消しなければならない。

この制約違反解消問題は、簡単のため分岐点を越えたスイッチ開放位置の変更はなく、各フィーダの線路径は同一であるものと仮定すれば、次のような0-1計画問題を解くことと等価である。

[目的関数]

$$\text{Min} \left[\sum_{q=1}^3 \max \{ p_{3q}(x_{kj}) - 1, 0 \} \right] \quad (5.3)$$

(フィーダ容量制約)

$$a_{11} + a_{12} + \sum_{j=3}^5 a_{1j} x_{1j} \leq f_1 \quad (5.4)$$

$$a_{21} + \sum_{j=2}^2 a_{2j} x_{2j} \leq f_2 \quad (5.5)$$

$$a_{41} + \sum_{j=2}^3 a_{4j} x_{4j} \leq f_4 \quad (5.6)$$

(変圧器容量制約)

$$(a_{11} + a_{12}) + a_{21} + \sum_{j=3}^5 a_{1j} x_{1j} + \sum_{j=2}^2 a_{2j} x_{2j} \leq c_2 \quad (5.7)$$

$$a_{41} + \sum_{j=2}^3 a_{4j} x_{4j} \leq c_4 \quad (5.8)$$

(電圧降下制約)

$$\sum_{j=1}^5 s_{1j} a_{1j} x_{1j} \leq v_1 \quad (5.9)$$

$$\sum_{j=1}^2 s_{2j} a_{2j} x_{2j} \leq v_2 \quad (5.10)$$

$$\sum_{j=1}^3 s_{4j} a_{4j} x_{4j} \leq v_4 \quad (5.11)$$

$$x_{kj} \in \{0, 1\} \quad (5.12)$$

ただし、 x_{kj} :フィーダ F_3 の負荷がブランチ k , 区間 j に移動したとき1、それ以外で0をとる0-1変数。ただし、 x_{kj} はブランチ k のフィーダ引出口側に隣接する区間が充電

されていない限り1とはなり得ない。 a_{kj}, z_{kj} : ブランチ k 、区間 j の負荷およびインピーダンス, z_{kj}' : ブランチ k 、区間 j の等価インピーダンス(平等分布負荷の場合には $z_{kj}' = \frac{1}{2}z_{kj}$), f_i, v_i : フィーダ i の容量および電圧降下許容量, c_t : 変圧器 t の容量, $s_{kj} = \sum_{u=1}^{j-1} z_{ku} + z_{kj}'$ 。

なお、(5.3)式で示される目的関数の中の p_{3q} は、多少複雑になるが、以下の $p_{31}' \sim p_{33}'$ を対応する制限値で規格化した値である。

① A点の電圧降下違反量 p_{31}

$$p_{31}'(x_{kj}) = V_1(x_{kj}) + \sum_{j=1}^2 a_{6j} s_{6j} \quad (5.13)$$

ただし、

$$V_1(x_{kj}) = V_2(x_{kj}) + \left\{ \sum_{j=1}^2 a_{6j} + (a_{16} + \sum_{j=3}^5 a_{1j}(1-x_{1j})) + (a_{44} + \sum_{j=2}^3 a_{4j}(1-x_{4j})) \right\} (z_{51} + z_{52}) + \sum_{j=1}^2 s_{5j} a_{5j} \quad (5.14)$$

$$V_2(x_{kj}) = \left\{ \sum_{j=1}^2 a_{5j} + \sum_{j=1}^2 a_{6j} + (a_{16} + \sum_{j=3}^5 a_{1j}(1-x_{1j})) + (a_{44} + \sum_{j=2}^3 a_{4j}(1-x_{4j})) + (a_{23} + a_{22}(1-x_{22})) \right\} (z_{31} + z_{32}) + \sum_{j=1}^2 s_{3j} a_{3j} \quad (5.15)$$

② C点の電圧降下違反量 p_{32}

$$p_{32}'(x_{kj}) = V_1(x_{kj}) + \sum_{j=3}^6 a_{1j}(1-x_{1j}) \times (z_{16} + z_{15} + \dots + z_{1,(j-1)} + z_{1j}') \quad (5.16)$$

③ フィーダ F_3 引出口の電流容量違反量 p_{33}

$$p_{33}'(x_{kj}) = \sum_{j=1}^2 a_{3j} + \sum_{j=1}^2 a_{5j} + \sum_{j=1}^2 a_{6j} + (a_{16} + \sum_{j=3}^5 a_{1j}(1-x_{1j})) + (a_{23} + a_{22}(1-x_{22})) + (a_{44} + \sum_{j=2}^3 a_{4j}(1-x_{4j})) \quad (5.17)$$

この問題は組合せ計画問題であり大規模なシステムにおいて、この問題を厳密に解くことは困難である。そこで、本解法では、双対有効勾配法の概念を用いた近似解法によって実用的な計算速度で解いている。解法のフローチャートを図5.4に示す。

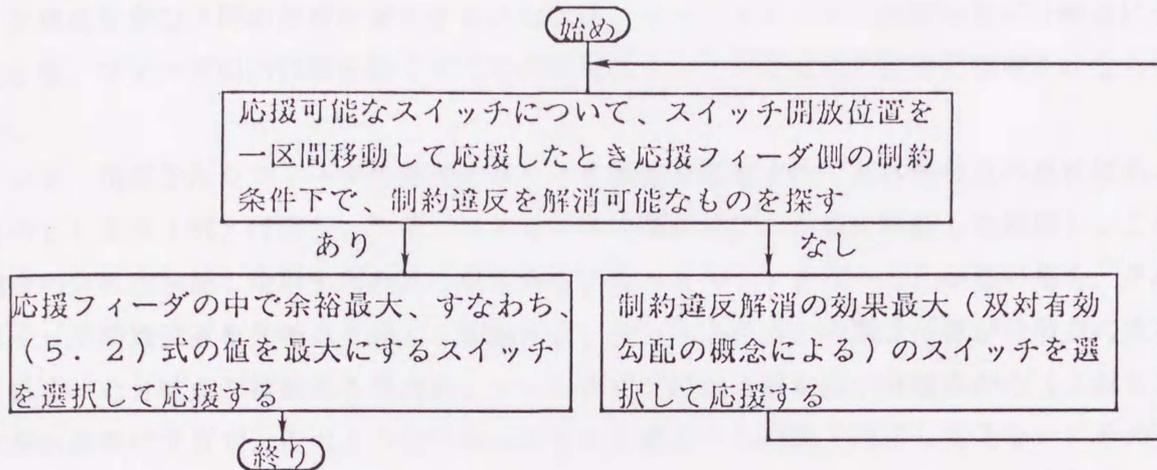


図5.4 制約違反解消アルゴリズム

(iii) ループスイッチの開放位置の変更

(i)の手順によって一つの分岐点の直前ですべてのカットスイッチが開放されるが、まだループスイッチは固定されているので必ずしもその分岐点の直前で開放されているとは限らない。そのままの状態でもカットスイッチの開放位置をその分岐点を越えて変更すると、分岐点を含む区間と、分岐点とループスイッチに囲まれる全区間の合計負荷が測定され、分岐点区間の負荷は測定されない。そのため、事前にループスイッチの開放位置をその分岐点の直前に変更しておかなければならない。なお、そのときに制約違反が発生するようならば(ii)の手順によって違反を事前に解消しておく必要がある。

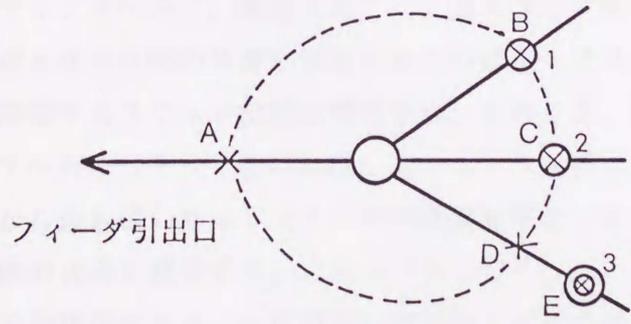


図5.5 分岐点周りのカットスイッチ

例えば、図5.5においてカットスイッチ1または2の開放位置をA点に変更すると、分岐点区間(A,B,C,D)と区間(D,E)の合計負荷が測定されてしまうので、事前にループスイッチ3の開放位置をD点に変更しておかなければならない。

(ii)分岐点を越えるカットスイッチの開放位置の変更

分岐点を含む区間の負荷を測定するためには、カットスイッチの開放位置が分岐点に至ったとき、フィーダ引出口側を除くすべての開放スイッチが分岐点の直前になければならない。

いま、指定されたフィーダの先端のスイッチ開放位置がすべてある分岐点の直前にあるものとしよう（例えば図5.5で、スイッチ3の開放位置がD点に移動した状態）。この場合の分岐点飛越し規則を次のように定める。カットスイッチが一つしかない場合、そのスイッチ開放位置を分岐点を越えて移動する。カットスイッチの開放位置が分岐点の直前に集まった分岐点が複数ある場合は、フィーダ引出口から最も遠い分岐点から（これも単に選択基準にすぎず、このような分岐点のどれを選んでも理論上は差し支えない）その分岐点の周りのカットスイッチで、制限値に対する余裕最大、すなわち、(5.2)式の値を最大にするカットスイッチを選択して、その開放位置を分岐点のフィーダ引出口側へ変更する。この場合、監視点位置が変わるので監視点の再計算が必要となる。

(b)一フィーダの全区間負荷測定アルゴリズム

以上に述べた方針に基づく一フィーダの全区間の負荷測定アルゴリズムを図5.6のフローチャートに示す。以下に各ステップの処理を説明しながら、測定方法について詳述する。

【ステップ1】もし、すべてのカットスイッチが分岐点の直前で開放されているような分岐点があれば、そのような分岐点の中で、フィーダ引出口より最も遠くにあるものを選択してステップ2へ行く。そのような分岐点がなければステップ4へ行く。

【ステップ2】ループスイッチが分岐点に隣接するスイッチ位置で開放されていないならば（図5.5参照）ステップ3へ行く。開放されていればステップ5へ行く。

【ステップ3】分岐点を含む区間の負荷を測定するためにループスイッチの開放位置を強制的にその分岐点に隣接するスイッチ位置に変更する。そのとき、制約違反が発生するようならば、ステップ7へ行く。そうでなければ、ステップ5へ行く。

【ステップ4】母線から最も遠いカットスイッチの開放位置をフィーダ引出口の方向へ一区間変更してこの区間の負荷を測定する。ステップ6へ行く。

【ステップ5】分岐点に隣接するフィーダ引出口側を除くすべてのスイッチ位置でスイッチが開放されている状態にある。このとき開放位置を分岐点を越えて変更可能な複数のカットスイッチがあるので、これらの中で(5.2)式の値を最大にするものを選択する。

なお、ここでループスイッチの開放位置を変更してもフィーダ電流に変化は生ぜず、開放位置変更の対象とならない。また、対応するループスイッチはこの操作の後、カットスイッチに変更されている。

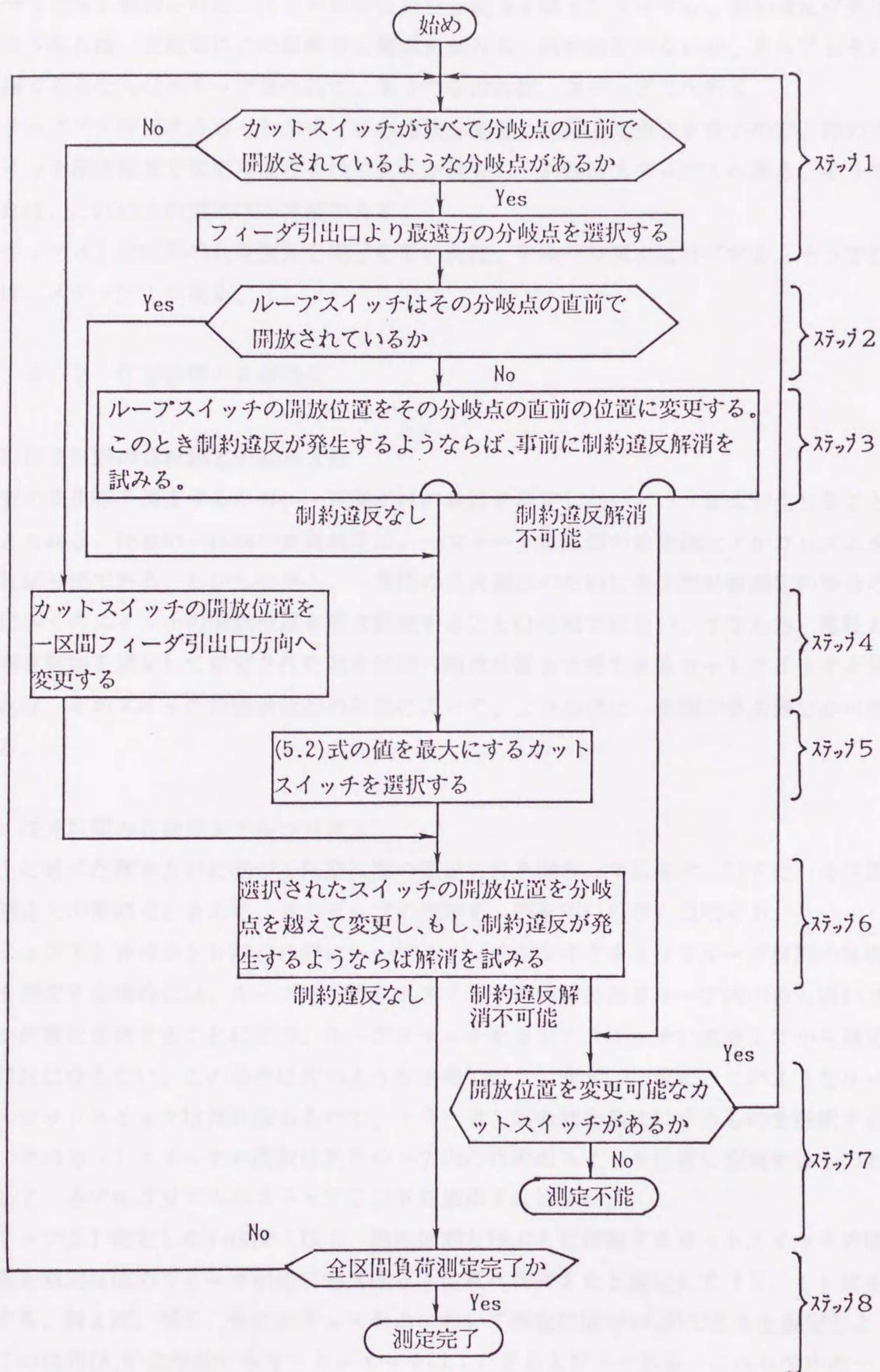


図5.6 一フィーダ全区間負荷測定アルゴリズム

【ステップ6】選択されたスイッチ開放位置を分岐点を越えて変更する。制約違反が発生するようならば、変更前にこの制約違反解消を試みる。制約違反がないか、あってもそれを解消できるならばステップ8へ行く。そうでなければ、ステップ7へ行く。

【ステップ7】注目するカットスイッチの開放位置をこれ以上変更できないので、他のカットスイッチ開放位置で変更可能なものがあるか調査し、あればステップ1へ戻る。そうでなければ、これ以上の測定は不可能である。

【ステップ8】全区間の負荷測定を完了していれば、アルゴリズムは終了する。そうでなければ、ステップ1へ戻る。

5.4.2 任意区間の負荷測定

(a) 任意区間の負荷測定の基本方針

需要の変化等を調査するため、一区間だけの負荷を測定したいという要求が生じることも考えられる。任意の一区間の負荷測定は、一フィード全区間の負荷測定アルゴリズムを用いれば可能である。しかしながら、一区間の負荷測定のために全区間負荷測定の場合のように多くのスイッチの開放位置を順次変更することは得策ではない。すなわち、電圧および容量制約を満足して指定された測定区間へ開放位置を変更できるカットスイッチを見つければ、そのスイッチの開放位置の移動によって、より高速に一区間の負荷測定が可能である。

(b) 任意区間の負荷測定アルゴリズム

以上に述べた基本方針に基づく任意区間の測定方法を図5.7に示す。以下に、全区間負荷測定との相違点を含めて、各ステップの処理を、例を用いながら説明する。

【ステップ1】分岐点と分岐点の間にループスイッチが存在するようなループ区間の区間負荷を測定する場合には、ループ外のカットスイッチの開放位置をループ内の最も近いスイッチ位置に変更することにより、ループスイッチをカットスイッチに変更してから測定しなければならない。この操作は次のような手順で行う。まず、一般に、このようなループ外のカットスイッチは複数個あるので、(5.2)式の値を最大にするものを選択する。次に、そのカットスイッチの開放位置をループ内の目的のスイッチ位置に変更するものとみなして、本アルゴリズムのステップ2以下を適用すればよい。

【ステップ2】測定したい区間（以下、測定区間と呼ぶ）に接続するカットスイッチの開放位置を測定区間のフィード引出口側スイッチ位置へ切替えたと仮定して(5.1)式を計算する。例えば、図5.8に示すシステムにおいて測定区間が(A,B)であると仮定しよう。この区間(A,B)に接続するカットスイッチは1, 2および3である。これらの中の一つのカットスイッチ開放位置をB点を経由してA点に変更することができるならば区間(A,

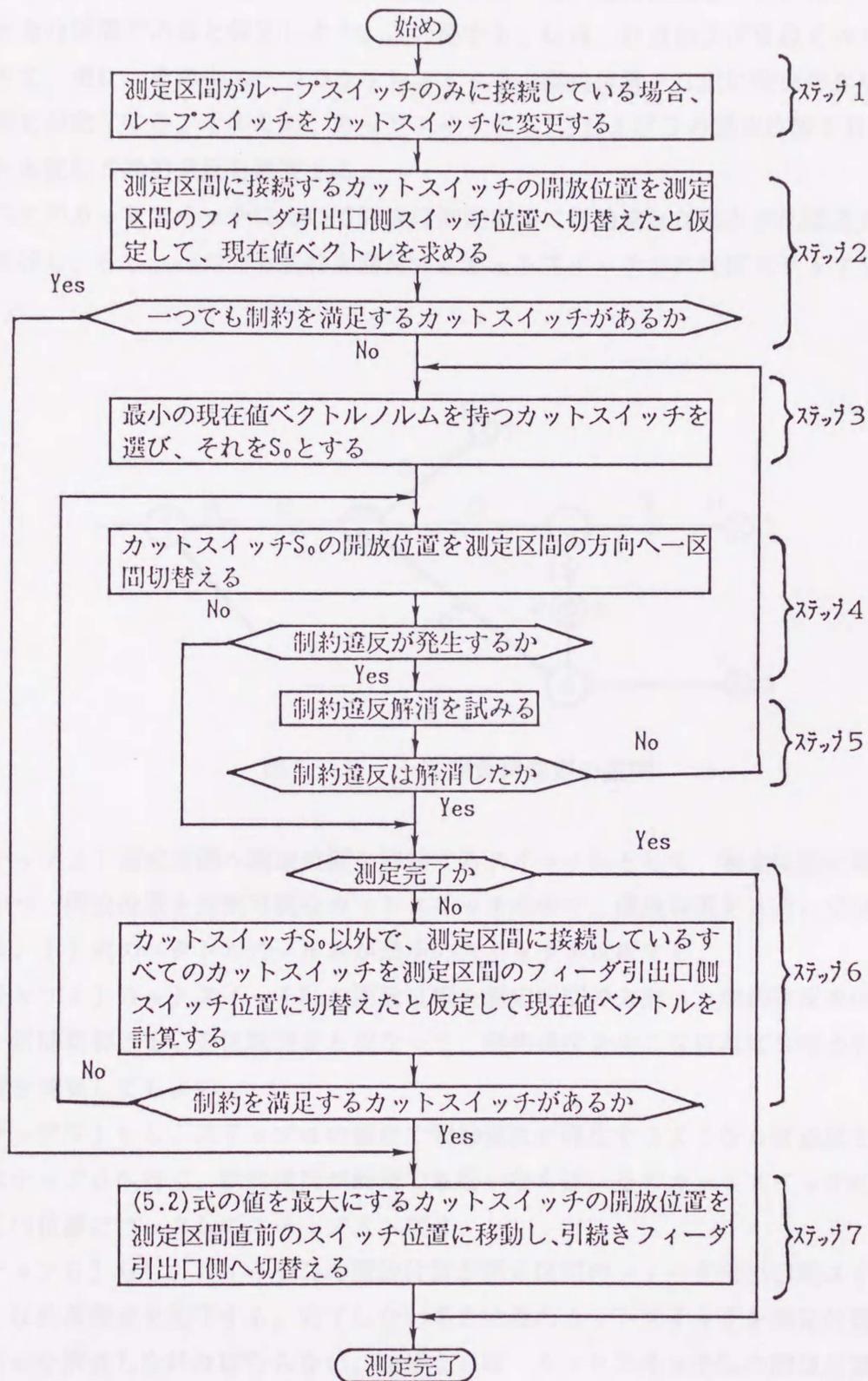


図5.7 任意区間の負荷測定アルゴリズム

B)の負荷測定は完了する。そこで、各カットスイッチの開放位置をそれぞれA点で開放したと仮定して制約違反が発生しないか調査する。一方、測定区間が(B,C,D,E)のように分岐点を含む区間であると仮定しよう。この場合も、C点、D点およびE点でスイッチが開放できて、更に、その中の一つのカットスイッチの開放位置をB点に変更できたとすると負荷測定が完了する。そのため、カットスイッチ1,2および3の開放位置をB点で開放したと仮定して制約違反を調査する。

すべてのカットスイッチについて開放位置変更時に制約違反が発生すればステップ3以下を実行し、もし、一つでも制約を満足するカットスイッチがあればステップ7へ行く。

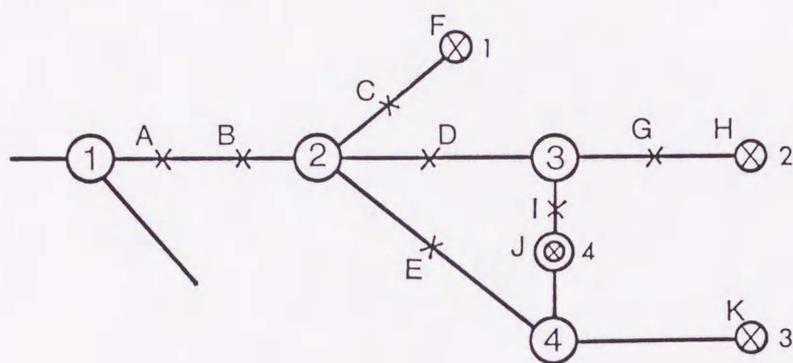


図5. 8 一区間負荷測定の説明

【ステップ3】測定区間へ開放位置を移動するスイッチ S_0 として、測定区間に隣接しており、かつ、開放位置を変更可能なカットスイッチの中で、開放位置をA点に変更したときの(5.1)式のベクトルのノルムが最小のスイッチを選択する。

【ステップ4】カットスイッチ S_0 の開放位置を測定区間の方向へ、制約違反を生じない限り、一区間切替える。全区間測定と異なって、制約違反を生じなければ分岐点を越えて開放位置を変更してもよい。

【ステップ5】もし、ステップ4の操作で制約違反が発生するようならば違反を解消した後、ステップ6へ行く。制約違反が解消できないならば、そのカットスイッチの開放位置をもとの位置にロックしてステップ3へ戻る。

【ステップ6】もし、スイッチ S_0 の開放位置が測定区間のフィーダ引出口側スイッチ位置にあれば負荷測定を完了する。完了しない場合は他のカットスイッチを測定位置で開放可能か否かを調査しなければならない。なぜならば、カットスイッチ S_0 の開放位置を測定区間の方向へ切替えて行くと、他のカットスイッチを測定位置へ切替えたと仮定したときの制約違反量も減少し、制約領域内に入る可能性があるからである。例えば、図5.8において、カットスイッチ1の開放位置をC点に変更したときノード#1~#2間の電流減少によっ

てスイッチ2または3の開放位置をA点に移動しても制約違反を発生しないことが考えられる。この場合、カットスイッチ2または3の開放位置を一挙にA点に変更することが可能である。この場合はこれで区間(A,B)の負荷測定を完了することができる。このように一挙に開放位置をA点に変更できるカットスイッチが存在しなければ、再びステップ4に戻る。

【ステップ7】ステップ2またはステップ6において、測定区間に開放位置を切替えることができる一つのカットスイッチが見いだされたときにはそのスイッチの開放位置を、複数のカットスイッチが見いだされたときには(5.2)式の値を最大にするカットスイッチを選択し、その開放位置を測定位置に変更することによって負荷測定を行う。

次のように負荷測定している。

図5-11 負荷測定時のインピーダンス

区間	位置(A)	インピーダンス	区間	位置(B)	インピーダンス	区間	位置(C)	インピーダンス
1	20	0.05	17	18	0.05	1	20	0.05
2	12	0.05	18	15	0.05	24	10	0.05
3	20	0.05	25	72	0.05	25	10	0.05
4	14	0.04	27	14	0.02	26	11	0.05
5	10	0.04	28	12	0.10	27	10	0.05
6	20	0.05	22	13	0.05	28	20	0.05
7	20	0.05	29	10	0.05	29	10	0.05
8	10	0.01	30	20	0.05	30	10	0.05
9	12	0.01	31	10	0.05	31	10	0.05
10	10	0.05	32	20	0.15	32	10	0.05
11	20	0.05	33	10	0.05	33	10	0.05
12	10	0.05	34	10	0.05	34	10	0.05
13	10	0.05	35	10	0.05	35	10	0.05
14	10	0.05	36	10	0.05	36	10	0.05
15	20	0.05	37	10	0.05	37	10	0.05
16	10	0.05	38	10	0.05	38	10	0.05

5.1.1.1 ノード位置の負荷測定

図5-11に示すようなノード位置の負荷測定を行う。図中で赤線を示したノード位置のインピーダンスを求め、そのインピーダンスが最小となるノード位置を開放位置として負荷測定を行う。以下、図5-11に示す負荷測定プログラムを実行して説明する。

1. ノード位置、およびインピーダンスのカットスイッチが開放されているノード位置(ステップ

5.5 適用例と考察

5.5.1 モデルシステム

本章で提案している負荷測定方法の理解を深めるために図5.9に示すような簡単なシステムを用いた数値例を説明する。表5.1に各区間の最大予測負荷およびインピーダンスを示す。このシステムの定格電圧は6.6[kV]、電圧降下許容限度は330[V]に設定してある。また、変圧器容量は600[A]、線路電流容量はすべて450[A]に設定している。なお、以下の説明においては理解を容易にするため、測定された区間負荷は最大予測値と同じであったものと仮定している。

表5.1 最大予測負荷とインピーダンス

区間	負荷[A]	インピーダンス	区間	負荷[A]	インピーダンス	区間	負荷[A]	インピーダンス
1	20	0.05	17	10	0.35	33	20	0.05
2	10	0.05	18	10	0.05	34	10	0.35
3	20	0.35	19	70	0.65	35	10	0.05
4	10	0.20	20	10	0.02	36	20	0.85
5	20	0.55	21	20	0.10	37	10	0.35
6	30	0.45	22	10	0.05	38	20	0.05
7	20	0.01	23	10	0.05	39	10	0.05
8	20	0.01	24	20	0.05	40	40	0.60
9	10	0.01	25	10	0.05	41	20	0.05
10	20	0.05	26	30	0.15	42	10	0.05
11	30	0.15	27	20	0.35	43	20	0.35
12	10	0.05	28	10	0.05	44	10	0.65
13	30	0.35	29	10	0.35	45	20	0.55
14	20	0.35	30	10	0.05	46	10	0.70
15	20	0.05	31	20	0.75	47	20	0.05
16	10	0.35	32	10	0.75	48	30	0.15

(a) 一フィーダ全区間負荷測定

図5.9に示すシステムのフィーダF₁の全区間負荷測定を考える。図中で番号を付した実線矢印および破線矢印はそれぞれ実際の測定および制約違反解消またはループスイッチ開放位置変更のためのスイッチの切替順序を表している。以下、図5.6に示す負荷測定アルゴリズムに従って説明する。

まず、ノード#3、#4および#6の直前でカットスイッチが開放されていないので(ステッ

プ1)、図中に示す順序でカットスイッチ2, 4および5の開放位置を変更し各々区間(M, N), (D, E), (O, P)の負荷を測定する。続いて、カットスイッチ1の開放位置をK点へ変更すると(ステップ4)、カットスイッチ1, 2および6のフィーダF₂側の電圧降下がそれぞれ 349.0 [V], 333.5 [V]および 370.5 [V]となり制約違反が発生する。そこで、フィーダF₂をフィーダF₄より応援するためにカットスイッチ6の開放位置をU点に変更すると、まず、カットスイッチ2の電圧降下制約が満足する。さらに、カットスイッチ6の開放位置をT点に変更することによりカットスイッチ1および6の電圧降下が制約を満足し、カットスイッチ1の開放位置をK点に変更できる。これにより区間(K, L)の負荷を測定できる(ステップ6)。

この状態で、すべてのカットスイッチ1, 2, 4および5が対応するノードの直前で開放されている(ステップ1)。しかしながら、ループスイッチ3がノード#4の直前のスイッチ位置F点で開放されていない(ステップ2)ので強制的にF点で開放する(制約違反は発生しない)。その後で、カットスイッチ4の開放位置をノード#4を越えてC点に変更して区間(C, D, F)の負荷を測定する(ステップ5)。以下、同様にして、図中に示す順序で合計14回のスイッチ開放位置変更でフィーダF₁の全区間の負荷を測定できる。

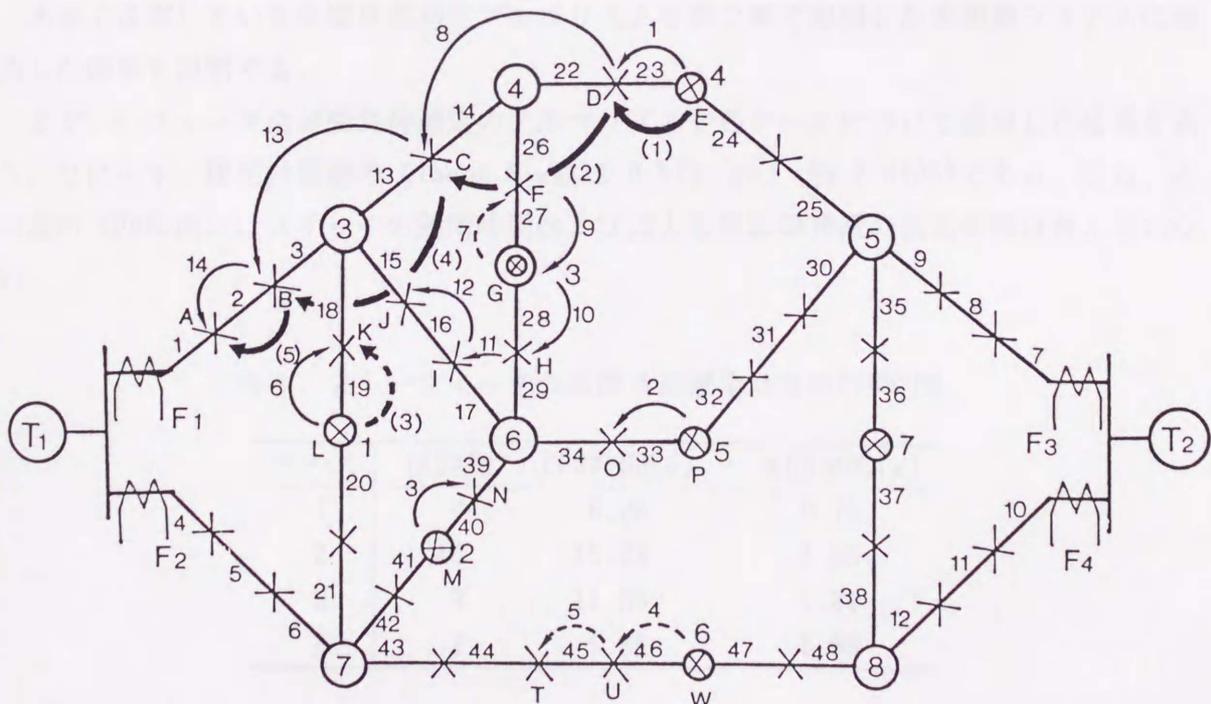


図5. 9 区間負荷測定のスィッチ・オペレーション

(b) 任意区間の負荷測定

図5. 9に示すモデルシステムの区間(A,B)の負荷を測定した例を図5. 7に示す負荷測定アルゴリズムに従って簡単に説明しよう。得られた測定手順を図5. 9の太線矢印および括弧内の数字で示している。

まず、カットスイッチ1, 2, 4および5の開放位置をA点に切替えたと仮定すると各スイッチ開放位置移動後の電圧降下および電流の(5. 1)式のベクトルノルムはそれぞれ、7.88, 8.44, 2.54および6.98であり、すべて1より大である(ステップ2)。すなわち、制約違反のないカットスイッチはないので、スイッチ S_0 としてカットスイッチ4を選択する(ステップ3)。続いてカットスイッチ4の開放位置を一区間ずつA点の方向へ移動して行く(ステップ4)。開放位置をD点へ変更しても制約違反が発生しない(ステップ5)。この状態で他のカットスイッチで開放点を一挙にA点に移動可能なものがない(ステップ6)ので、更に、カットスイッチ4の開放位置をC点、そして、B点へ変更する(ステップ4)。この場合、制約違反が発生するので事前に応援が必要である。応援候補スイッチは1, 2, 6および7である。ここではカットスイッチ1の開放位置をK点に変更して制約違反を解消できる(ステップ5)。以下、カットスイッチ4の開放位置を合計4回変更することにより、区間(A,B)の負荷を測定できる。

5. 5. 2 実規模システム

本章で提案している区間負荷測定アルゴリズムを第2章で説明した実規模システムに適用した結果を説明する。

まず、一フィーダ全区間負荷測定のアルゴリズムを四ケースについて適用した結果を表5. 2に示す。使用計算機のGibson Mix値は0.513 [μ s] (約2 MIPS)である。なお、この表のCPU時間にはスイッチの開閉時間および遠方監視制御装置の伝送時間は含んでいない。

表5. 2 一フィーダ全区間負荷測定計算のCPU時間

ケース	区間数	CPU時間[s]	一区間平均[s]
1	8	6.08	0.76
2	15	15.73	1.05
3	9	11.35	1.26
4	2	1.36	0.68

この表から一区間当たりの負荷測定に要するCPU時間は高級パソコン程度の演算能力しかない計算機においても0.68~1.26秒であることが分かる。

他方、任意区間の負荷測定のアлゴリズムをフィーダ引出口に隣接する区間およびシステムのさまざまな区間に適用してみたところ、CPU時間は多くとも 1.0秒であり、実用上十分であることが分かった。

5.6 まとめ

本章では、第4章で明らかにされた区間負荷測定の基本的な計算方法を基にして、電圧降下および容量制約を考慮した、より実用的な区間負荷測定アルゴリズムを提案した。まず、制約の監視点の定め方、制約に対する余裕量および違反量の評価方法を与えた。次に、区間負荷の測定途中において、制約違反が発生するようなスイッチ操作が行われるようならば、事前にこの制約違反の解消に最も効率的なフィーダから応援する方法を述べた。この制約違反解消のための応援フィーダ選択問題は、本質的には複雑な組合せ計画問題になっているので、双対有効勾配法の概念を用いた近似解法によって解を得た。以上のことをまとめて、供給区域全体および任意区間の負荷測定アルゴリズムを作成した。最後に、本アルゴリズムをソフトウェアとして具体化して、第2章で述べた実規模システムでシミュレートすることにより、その妥当性および実用性を検証した。

第 6 章

容量制約を考慮した事故時負荷切替

第6章 容量制約を考慮した事故時負荷切替

6.1 概要

常時開放形ループ配電システムにおいて事故が発生した場合は事故区間を区間スイッチで遮断するため、事故区間を経由して供給されていた健全区間が供給支障区域となる。そこで、この健全区間の負荷を、他の変圧器により事故区間を迂回するルートから供給する方法がとられている。この作業の手順は以下のとおりである。1)事故区間を検出し、除去する、2)区間スイッチの開放位置の変更によって、供給支障となっている健全区間へ他の変圧器から供給する(負荷切替)、および 3)平常運転へ復旧する。

本章はこれらの作業の中で2)について述べる。この負荷切替は具体的には区間スイッチのスイッチ・オペレーションによって行われるが、都市部における配電システムは大規模で緊密に連係しているため非常に複雑な作業となっている。そのため、現実には熟練した配電技術者の判断に頼るか、あるいは、負荷切替操作を単純にするために変圧器および配電線の余裕を非常に多くしている。しかしながら、配電技術者を訓練することは多くの費用と時間を必要とし、その上、変圧器および配電線の余裕を多くすることは確率の少ない事故に対して過剰設備を設けることになるから経済的ではない。

そこで、本章では、第5章で述べた負荷測定方法を用いて、各区間の需要(負荷)が測定されているという条件の下で、変圧器容量および線路容量の制約を付した組織的で実用的な負荷切替方法を提案する。この負荷切替方法は配電システムにしばしば生じる変圧器および配電線の単一事故に対しても適用できる。

本問題は、配電システム内のすべての区間スイッチの開閉状態を決定することであるから、本質的には組合せ問題となる。すなわち、大規模な実規模システムに対して短時間でこの問題の最適解を求めることは困難である。他方において、実用的見地からは停電となっている健全区間へ短時間で供給する必要がある。したがって、この問題に対する最適解を厳密な最適化手法(例えば、分枝限定法)を用いて多くの時間を費やして求めることは実

用的ではない。

本章では、事故区間を除いた全停電区間を、あらかじめ指定された応援順序で他の変圧器から電流容量制約下で負荷切替によって効率良く、許容時間内に復旧する方法を提案している^{(41)~(47)}。この方法の特徴は、(i)変電所間の物理的な距離または配電システムの特性などから、あらかじめ応援変圧器を指定できる、(ii)アルゴリズムが簡潔で段階的に構成されている、などである。まず、負荷切替問題は、応援側変圧器をソース、停電となっている健全区間をシンクとするネットワークのネットワークフロー問題として定式化できることを示す。次に、この問題が一種の部分和问题になっていることに着目し、部分和问题の近似解法を応用して、一次的な近似解を得る”基本的な負荷切替アルゴリズム”を提案する。その後で、この近似解を改良するために、ソース側フィード間の負荷持換(置換)を行う”負荷置換アルゴリズム”を提案する。更に、ループスイッチの開放位置を調整することにより、負荷切替量をより増加させることができることを示し、”ループスイッチに関するアルゴリズム”を提案する。以上のアルゴリズムを総合して、”負荷切替アルゴリズム”を提案する。この負荷切替アルゴリズムを順次指定された応援側変圧器をソースとして、全停電区間が復旧されるまで繰返し適用する。もし、負荷切替途中において変圧器またはフィードの電流容量に制約違反が発生するようならば、制約違反となる変圧器またはフィードを仮想的なシンクとし、本来の負荷切替に関係しない変圧器を仮想的なソースとして、上述の負荷切替アルゴリズムを再帰的に適用することにより、制約違反を事前に解消している。最後に、これらの負荷切替アルゴリズムを実規模システムにおいて想定される変圧器事故に適用して、本アルゴリズムの妥当性と実用性を検証している。

なお、本章では、変圧器を中心とした負荷切替を考察するので、変圧器を根とする根付き木を採用している。

6. 2 問題の説明

負荷切替問題の説明を容易にするため、図6. 1に示すモデルシステムを考えよう。

いま、図6. 1において変圧器 T_3 が故障したとすると、変圧器母線スイッチが開放されるため、カットスイッチ1, 2, 7, 10, 8および5で囲まれた健全区域が停電する。この状態において、このシステムの一部に着目したのが図6. 2(a)である。この図ではカットスイッチ2の左側が変圧器 T_1 によって供給されており、右側は停電している。このとき、カットスイッチ2の開放位置を図6. 2(b)のようにA点からB点へ切替えると、区間(A, B)の負荷は変圧器 T_1 から供給されるようになり、この区間の停電は解消される。このようにカットスイッチの開放位置を停電区域方向へ切替えることによって、負荷が他の変圧器へ切替わるので、このスイッチ・オペレーションを事故時負荷切替と呼ぶことにする。以上のような考え方をを用いてカットスイッチの開放位置を順次、故障変圧器側

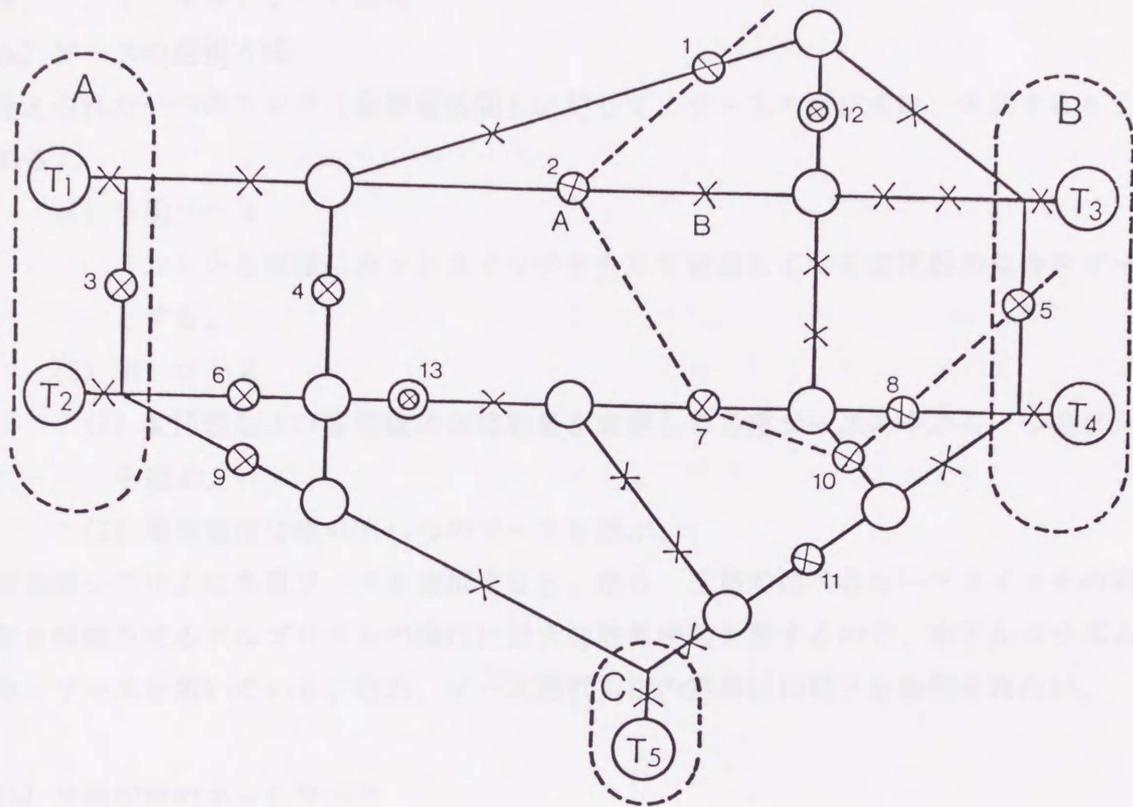


図6. 1 事故時負荷切替のモデルシステム

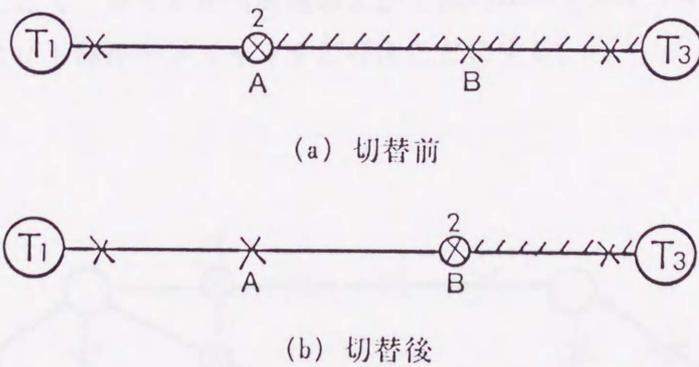


図6. 2 カットスイッチの開放位置変更による負荷切替

へ切替えて行くことにより、停電区域が縮小されていくが、その分だけ健全な変圧器側へはこれまで以上の負荷がかかることになる。実際には変圧器および配電線の容量には制限があるため負荷切替操作は容易ではない。従って、変圧器および配電線の電流容量制約下でいかに効率良く負荷を切替えるかという問題が生じる。これを負荷切替問題という。

6.3 問題の定式化

6.3.1 ネットワーク表現

(a) ソースの選択方法

与えられた一つのシンク（全停電区間）に対して、ソースの選び方は、大別すると二通りある。

(1) 多重ソース

シンクと直接にカットスイッチを介して連結している変圧器の集合をソースとする。

(2) 単一ソース

(i) 変圧器および配電線の余裕容量を考慮して多重ソースの中から一つのソースを選ぶ。

(ii) 優先順位に従って一つのソースを選ぶ。

実規模システムに多重ソースを適用すると、第6.5節で述べるループスイッチの開放位置を移動させるアルゴリズムの実行に膨大な計算時間を要するので、本アルゴリズムでは単一ソースを用いている。なお、ソース選択方法の詳細は付録2を参照されたい。

(b) 負荷切替のネットワーク

ソース s およびシンク t を定めると、負荷切替の問題は一般に図6.3に示すようなネットワークで表現できる。この図は s および t を根とする根付き木を表わしている。例えば、 s および t をそれぞれ図6.1の T_1 および T_3 に対応させると、図6.3は T_3 から T_1 への負荷切替を表す。ここで、カットから s 側および t 側のループスイッチをそれぞれ、 s 側ループスイッチおよび t 側ループスイッチと呼ぶことにする。

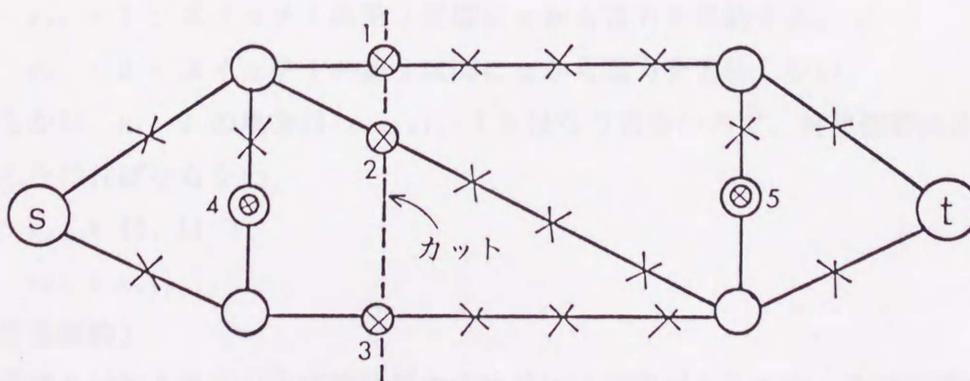


図6.3 s および t を根とする根付き木

6.3.2 定式化の範囲

定式化を行う際には、開放位置が分岐点を越える場合も含めて定式化する必要がある。しかし、そのような定式化を行った場合、どのカットスイッチの開放位置が分岐点を越えるかを表現するための変数や制約が増加してしまう。また、第6.5節で述べるように、s側ループスイッチの開放位置の調整により目的とするフィーダの余裕容量を増加させるか、または、sが一度に取込む区間数を減少させることも可能である。しかしながら、ループスイッチの開放位置の変更はカットスイッチの開放位置の変更に依存するため、一般的な表現が困難である。そこで、本定式化では、カットスイッチの開放位置が分岐点の直前まで移動する場合の定式化を行う。なお、分岐点を越える開放位置の変更およびループスイッチの処理についてはそれぞれ第6.4.1節および第6.5節で述べる。以下では第6.3.1節で述べた方法でsおよびtが選択されたとしてカットスイッチ開放位置の変更を分岐点の直前までに限定した場合の負荷切替問題を0-1整数計画問題に定式化することを考える(図6.4参照)。

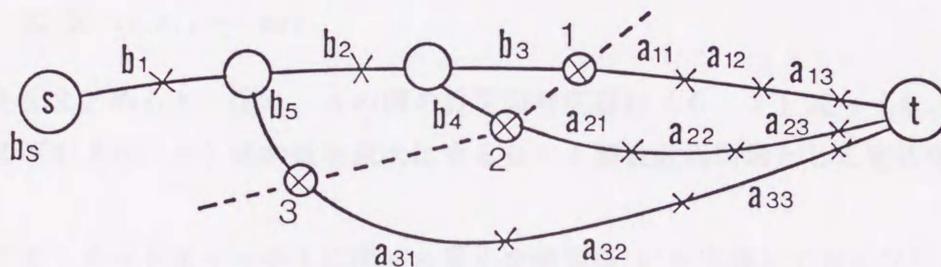


図6.4 負荷切替の例

6.3.3 制約条件

(整数条件)

スイッチ i の第 j 区間に s から電力を供給するか否かを表す決定変数を x_{ij} として、次のように定義する。

$x_{ij} = 1$: スイッチ i の第 j 区間に s から電力を供給する。

$x_{ij} = 0$: スイッチ i の第 j 区間に s から電力を供給しない。

明らかに、 $x_{ij}=0$ の場合は $x_{i(j+1)}=1$ とはなり得ないので、負荷切替は次式の制約を満足しなければならない。

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (6.1)$$

$$x_{ij} \geq x_{i(j+1)} \quad (6.2)$$

(容量制約)

配電線を通る電流および変圧器の供給量には制限があるため、負荷切替は以下のような制約の下で行われなければならない。

$$\sum_j a_{1j}x_{1j} \leq b_3, \quad \sum_{j \geq e} a_{1j}x_{1j} \leq c_{1e}, \quad (6.3)$$

$$\sum_j a_{2j}x_{2j} \leq b_4, \quad \sum_{j \geq e} a_{2j}x_{2j} \leq c_{2e}, \quad (6.4)$$

$$\sum_j a_{3j}x_{3j} \leq b_5, \quad \sum_{j \geq e} a_{3j}x_{3j} \leq c_{3e}, \quad (6.5)$$

$$\sum_j a_{1j}x_{1j} + \sum_j a_{2j}x_{2j} \leq b_2, \quad (6.6)$$

$$\sum_j a_{1j}x_{1j} + \sum_j a_{2j}x_{2j} + \sum_j a_{3j}x_{3j} \leq \min(b_s, b_1) \quad (6.7)$$

ただし、 a_{ij} 、 c_{ie} :スイッチ i から t 側へ向かって第 j 番目の区間の負荷および線路容量、 b_s :変圧器 s の余裕容量、 b_k :ブランチ k 上の各区間における線路余裕容量（線路容量と通過電流との差）の最小値。

6.3.4 目的関数

できるだけ多くの停電を解消することより目的関数は次のようになる。

$$\sum_i \sum_j a_{ij}x_{ij} \rightarrow \max \quad (6.8)$$

以上をまとめると、図6.4の例の負荷切替問題は(6.1)式～(6.7)式の制約条件の下で(6.8)式の値を最大にする0-1整数計画問題として定式化される。

ここで、カットスイッチ i に関する最小余裕容量 b^i を定義しておく⁽¹⁶⁾。すなわち、最小余裕容量 b^i とは、カットスイッチ i から s 側の幹上のすべての区間の線路余裕容量および変圧器 s の余裕容量の最小値である。この b^i は、物理的には、カットスイッチ i の開放位置を他のスイッチと独立に移動することによって s から t へ供給できる量を表す。例えば、図6.4のカットスイッチ1の場合は、 $b^1 = \min(b_s, b_1, b_2, b_3)$ である。



6.4 負荷切替アルゴリズム

6.4.1 基本的なアルゴリズム

第6.3節の(6.1)式～(6.8)式で定式化された負荷切替問題は組合せ最適化問題であるため実規模システムにおいて実用的な計算時間で厳密解を得ることは困難である。ところが、本問題が一種の部分和问题になっていることに着目し、部分和问题の近似解法アルゴリズムの考え方をを用いて以下に示す基本的な負荷切替アルゴリズムBLTA (Basic Load Transfer Algorithm)を提案する。

[アルゴリズムBLTA]

【ステップ1】 (6.9)式によって定められるカットスイッチ \hat{i} の開放位置を t 側へ一区間変更する。

$$a_{\hat{i}} = \max_{i \in I'} a_{i1}, \quad I' = \{i | a_{i1} \leq b^1, i \in I\} \quad (6.9)$$

ただし、 I はカットスイッチのインデックス集合である。 $I' = \emptyset$ ならばBLTAは終了する。もし、すべてのカットスイッチの開放位置が変圧器母線のスイッチに達したならば s から t への負荷切替は完了する。

【ステップ2】 $b^1, i \in I$ を更新してステップ1へ戻る。

アルゴリズムBLTAの実行中に複数のカットスイッチの開放位置が一つの分岐点の直前にある場合は、最大の最小余裕容量を有するカットスイッチの開放位置をその分岐点を越えて移動させる(図6.5参照)。そして、新たに図6.4に対応するネットワークを作り、そのネットワーク上でアルゴリズムBLTAを実行する。

なお、アルゴリズムBLTAの別解法については付録3を参照されたい。

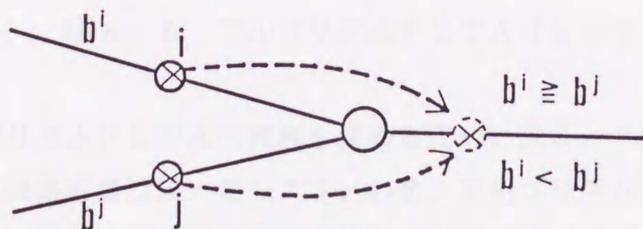


図6.5 分岐点を越える開放位置の変更基準

配電システム運用上の見地からは、事故時に円滑な負荷切替を行うために同一の線路容量を有する配電線を装備することが望ましい。すべての配電線の容量が同じならば、フィード引出口の余裕容量を把握するだけでよい。このような場合には、最小余裕容量を簡単に求めることができるので、本アルゴリズムは最も効率良く実行される。

6.4.2 区間負荷の置換を含むアルゴリズム

アルゴリズムBLTAでは、高速に近似解を得るために、簡潔な解法を用いている。そこで、その近似解では不十分な場合には、その解を改良するためにフィード間の負荷置換を行うことを考える。そのために、 k 個のカットスイッチの開放位置を s 側へ戻し、すなわち、一旦負荷移動量を減少させて、その代わりに、他のカットスイッチの開放位置を t 側へ移動させて負荷移動量の増加を計る。このスイッチ・オペレーションは明らかに組合せ的である。ところが、本問題の性質上、短時間で計算する必要があるので実用上は多くとも $k=2$ とする。例えば、図6.7に $k=1$ の場合の置換アルゴリズム PLTA (Permutation Load Transfer Algorithm)を示す。

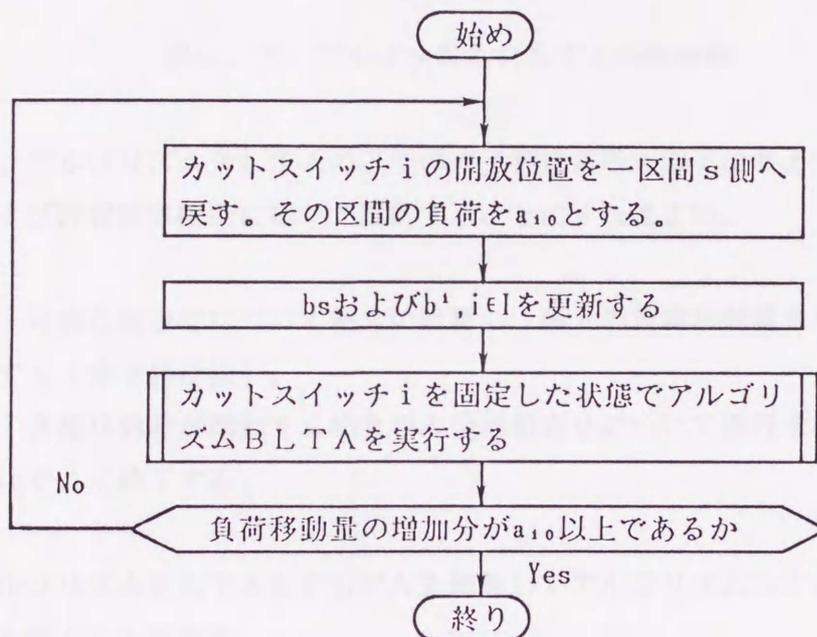


図6.6 アルゴリズムPLTA ($k=1$)

ここで、アルゴリズムPLTAの理解を深めるために図6.7に示すシステムを考えよう。簡単のため、線路容量は同一としよう。いま、アルゴリズムBLTAを実行した結果各カットスイッチの開放位置が破線で示す位置に来て、 $I' = \emptyset$ となり、 $b^1 = b_s = 3$, $i \in I = \{1, 2, 3, 4\}$ とする。そこで、例えばカットスイッチ1の開放位置を一旦一区間ほど s 側へ戻したとすると、カットスイッチ1の最小余裕容量8ほど増加して11となる。そして、カットスイッチ1を固定するので、 $I = \{2, 3, 4\}$ となる。次に、この状態を初期状態としてアルゴリズムBLTAを実行すると、カットスイッチ4および3の開放位置が一区間 t 側へ変更される。このときの負荷移動量は $11(=6+5)$ であり、カットスイッチ1の開放位置を1区間戻した減少量8より3ほど増加している。

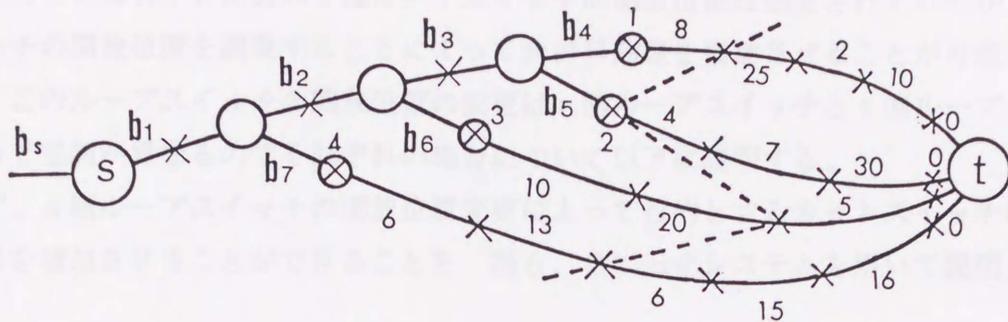


図6. 7 アルゴリズムPLTAの数値例

ところで、アルゴリズムPLTAの二つの終了判定基準を以下に与えておくので、計算機の能力および許容計算時間に応じて選択することにすればよい。

- [基準1] 可能な組合せについて独立に計算し、最大の負荷移動量を与えるものを選択する（完全列挙法）。
- [基準2] 負荷移動量が増加する場合のみ他の組合せについて実行する。減少した場合はそこで終了する。

なお、アルゴリズムBLTAとPLTAを総称してアルゴリズムLTA (Load Transfer Algorithm)と呼ぶことにする。

6.5 ループスイッチの開放位置変更

6.5.1 ループスイッチ開放位置変更の意義

アルゴリズムLTAにおいてはループスイッチの開放位置は固定されていたが、ループスイッチの開放位置を調整することによって負荷移動量を増加させることが可能な場合がある。このループスイッチの開放位置の変更はs側ループスイッチとt側ループスイッチによって意義が異なるのでそれぞれの場合について以下に説明する。

まず、s側ループスイッチの開放位置変更によって目的とするカットスイッチの最小余裕容量を増加させることができることを、図6.8に示すシステムを用いて説明しよう。

いま、区間(A,C)および(B,D)の区間負荷をそれぞれpおよびqとする。このとき、 $p > \min(b_1, b_2, b_s)$ ならばカットスイッチ1の開放位置をC点に移動することはできない。ここで、 $p < b_1 + q < \min(b_2, b_s)$ であると仮定する。このとき、 $q \leq \min(b_3, b_4)$ なる制約の下でループスイッチ3の開放位置をB点からD点へ変更できるならば、カットスイッチ1の最小余裕容量は b_1 から $b_1 + q$ に増加する。その結果、カットスイッチ1の開放位置をC点へ変更できる。

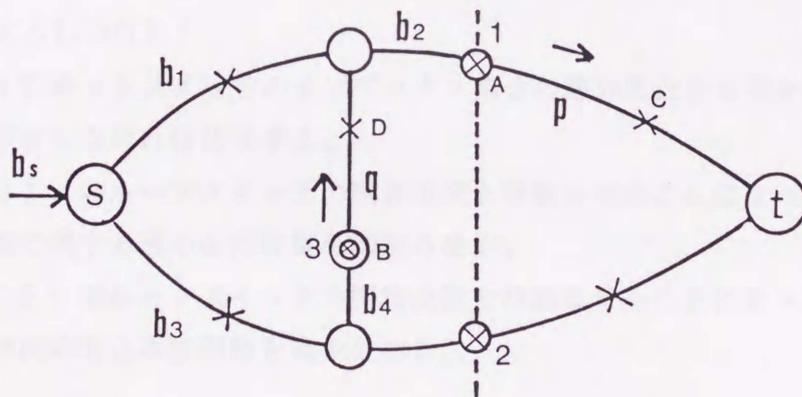


図6.8 s側ループスイッチの開放位置変更

次に、t側ループスイッチの開放位置変更によってsが一度に取込む区間数を減少させることにより、カットスイッチの開放位置変更を可能にする場合がある。このことを図6.9に示すシステムを用いて説明しよう。

いま、区間(A,B,C)および(B,D)の負荷をそれぞれpおよびqとする。このとき、 $\min(b_1, b_s) < p + q$ ならばカットスイッチ1の開放位置をC点へ変更することはできない。ここで、 $p < \min(b_1, b_s) < p + q$ とする。従って、 $q < \min(b_2, b_3)$ なる制約の下で、ループスイッチ3の開放位置をB点へ変更できるならばカットスイッチ1の開放位置をC点へ変更することが可能となる。

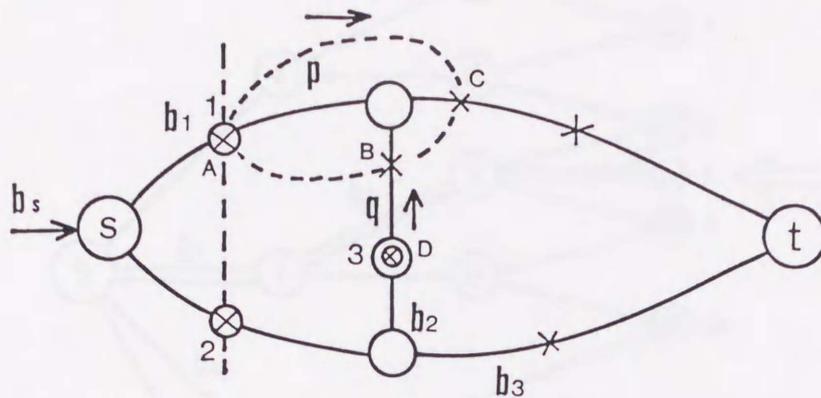


図6. 9 t側ループスイッチの開放位置の変更

6. 5. 2 ループスイッチに関するアルゴリズム

第6. 5. 1節で述べた考え方を基にしてループスイッチの開放位置を調整するためのアルゴリズム (LOOP) を作成する。

〔アルゴリズム LOOP〕

【ステップ1】カットスイッチのインデックス集合の部分集合から葉を選ぶ。条件を満足させる葉が存在しなければ終了する。

【ステップ2】s側ループスイッチの開放位置を移動させることによって、ステップ1で選ばれた葉に関する最小余裕容量を増加させる。

【ステップ3】t側ループスイッチの開放位置を移動させることによってステップ1で選ばれた葉の次の取込み区間数を減少させる。

以下に各ステップを説明する。t側ループスイッチに関するアルゴリズムもs側ループスイッチのアルゴリズムとほとんど同様であるので、簡単のためs側ループスイッチについて説明する。

1) ステップ1の説明

簡単のため、図6. 10に示す例を用いよう (繁雑さを避けるために、図6. 10～図6. 12においては投入スイッチは省略している)。まず、カットスイッチのインデックス集合は $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ である。そして、ステップ1で述べたカットスイッチのインデックスの部分集合を以下のようにして作る。

まず、カットスイッチに関する幹にループスイッチが連結していなければ、そのカットスイッチのインデックスをインデックス集合から除く。この例では $\{5, 6\}$ をインデッ

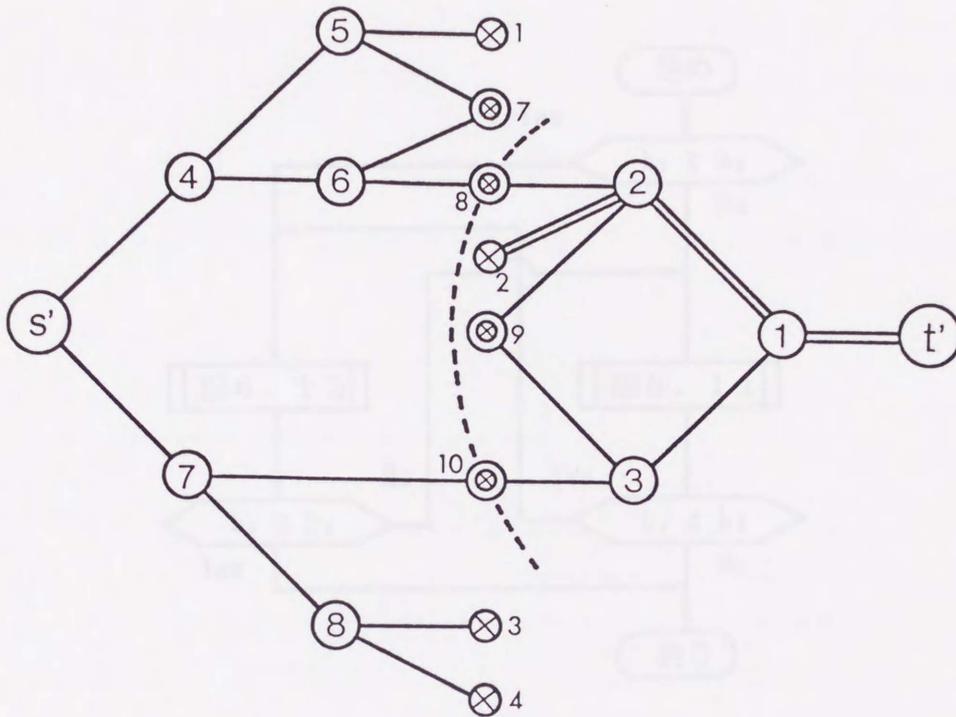


図6. 1 1 仮想的なソース s' およびシンク t' を根とする根付き木 ($b_1 < b_2, b_3$)

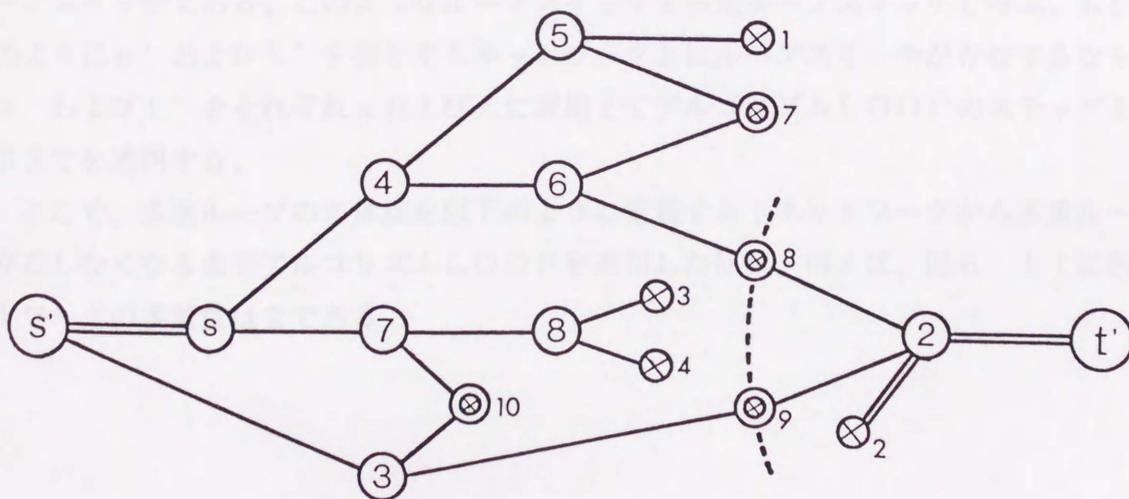


図6. 1 2 仮想的なソース s' およびシンク t' を根とする根付き木 ($b_2 < b_1, b_3$)

次に、初期条件を、 $b_3 \gg b_1, b_2$ かつ $b_2 > b_1$ としよう。そのとき、図6.11に示す負荷移動の結果が $b_1 > b_2$ となるならば図6.12に示す負荷移動を実行する。そして、図6.12に示す負荷移動の結果が $b_2 > b_1$ となるならば、再び図6.11に示す負荷移動を実行する(図6.13参照)。

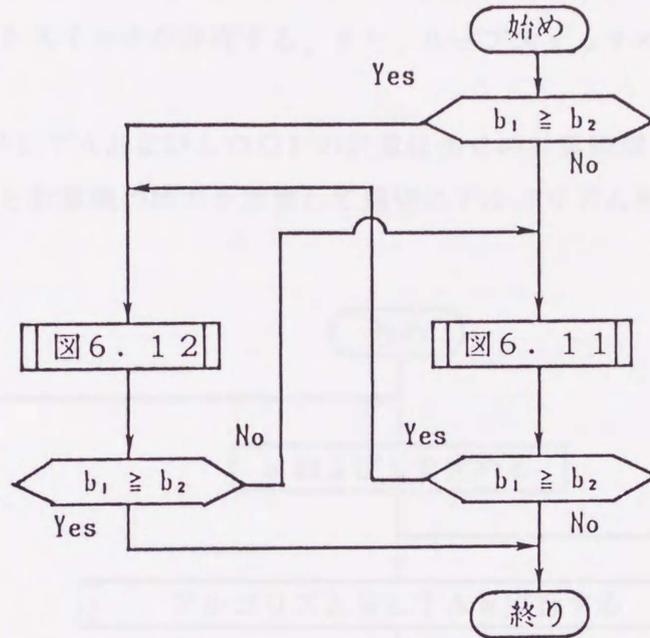


図6.13 アルゴリズムLOOPの適用例

3) 多重ループスイッチの計算

図6.11中のループスイッチ9は s' および t' を根とするネットワークの t' 側ループスイッチである。このようなループスイッチを多重ループスイッチと呼ぶ。もし、このように s' および t' を根とするネットワーク上にループスイッチが存在するならば、 s' および t' をそれぞれ s および t に置換えてアルゴリズムLOOPのステップ1から3までを適用する。

ここで、多重ループの多重度を以下のように定義する；ネットワークから多重ループが存在しなくなるまでアルゴリズムLOOPを適用した回数。例えば、図6.11に示すネットワークの多重度は2である。

6.6 総合的な負荷切替アルゴリズム

前節までに述べた個々のアルゴリズムを総合した”負荷切替アルゴリズム”をフローチャートの形で図6.14に示す。以下に実際に適用する際の注意点を述べておく。

- 1) 実規模システムにおいては、定められたソースとシンクに対するネットワーク中に多くとも10個のカットスイッチが存在する。また、ループスイッチの多重度は多くとも2である。
- 2) アルゴリズムPLTAおよびLOOPの計算は多くの計算時間を必要とするので、配電システムの規模と計算機的能力を考慮して適切にアルゴリズムを選択する必要がある。

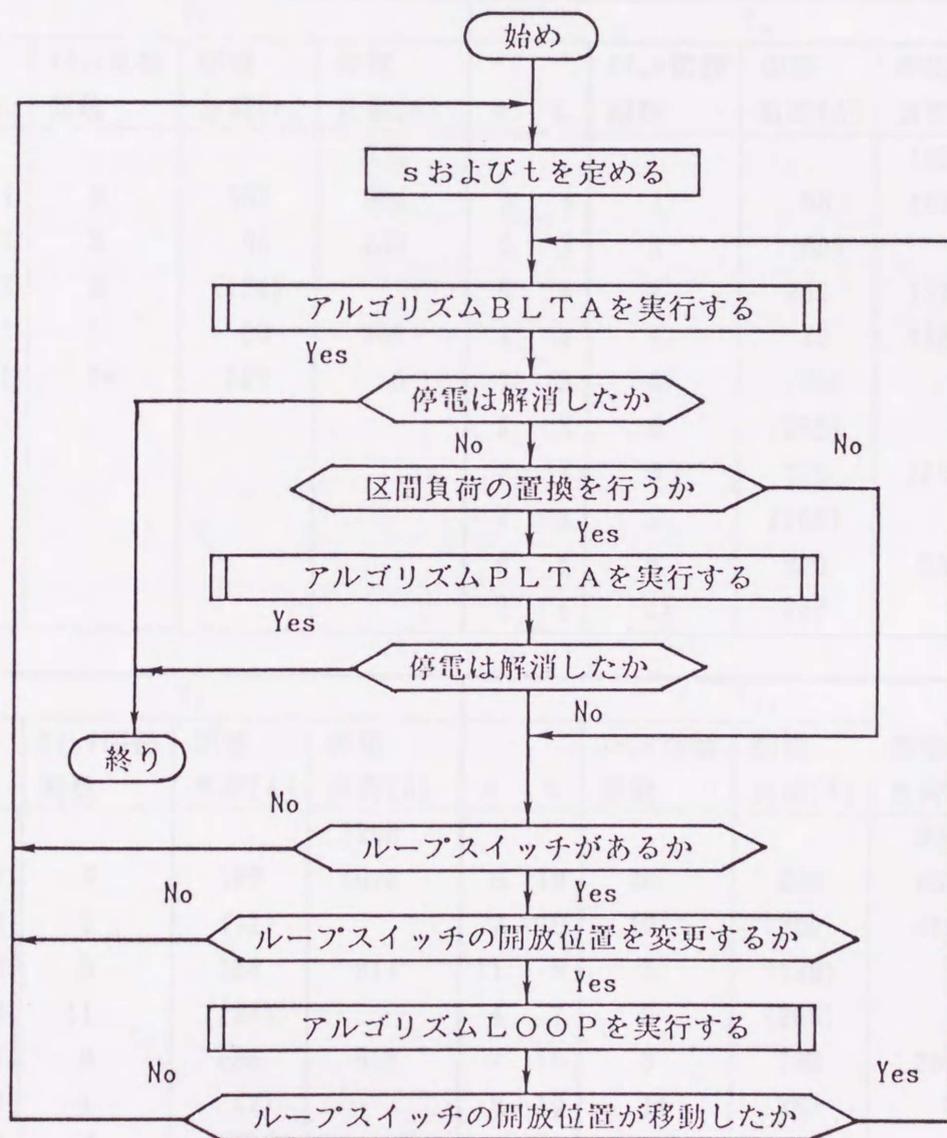


図6.14 総合的な負荷切替アルゴリズムのフローチャート

6.7 数値例と考察

実規模システムにおいて、四つの変圧器事故を仮定し、本章で提案している事故時負荷切替アルゴリズムを適用して数値計算を行った。表6.1はこれらの変圧器事故に対する負荷切替の数値計算結果を示す。実用的見地と第6.6節で述べた理由からアルゴリズムPLTAおよびLOOPに対しては単純なアルゴリズムを適用したプログラムを作成している。利用した計算機はHITAC M-680/H (ギブソンミックス値 32ns)である。以下にこの数値計算結果を簡単に説明しよう。

表6.1 実規模システムの数値計算結果

T ₁				T ₄					
s	t	スイッチ切替回数	切替負荷[A]	停電負荷[A]	s	t	スイッチ切替回数	切替負荷[A]	停電負荷[A]
				772					1697
3	1	8	388	384	5	4	1	68	1629
4	1	3	96	288	5	3	1	(60)	
5	3	3	(124)		6	4	2	255	1374
3	1	1	86	202	1	4	1	40	1334
2	1	1*	267	0	1	3	6	(70)	
					2	3	6	(255)	
					7	4	3	125	1209
					7	8	5	(106)	
					8	4	6	370	839
					3	4	1*	846	0

T ₇				T ₁₀					
s	t	スイッチ切替回数	切替負荷[A]	停電負荷[A]	s	t	スイッチ切替回数	切替負荷[A]	停電負荷[A]
				1258					924
9	7	6	186	1072	8	10	20	266	658
9	8	2	(11)		7	10	10	200	458
10	7	5	158	914	11	9	5	(136)	
3	8	11	(234)		4	7	9	(295)	
4	7	9	295	619	7	10	3	193	265
4	8	1	(7)		9	10	1*	362	0
5	7	7	144	475					
8	7	1*	529	0					

(*:ブスタイCB投入)

まず、変圧器 T_1 に事故が生じたとしよう。このときの全停電負荷は 772 [A]である。最初に、変圧器 T_3 および T_1 をそれぞれsおよびmとして負荷切替アルゴリズムを適用した結果、8回のスイッチ切替により 388 [A]の負荷が変圧器 T_1 から T_3 へ移動して全停電負荷が 384 [A]に減少する。次に、変圧器 T_1 から3回のスイッチ切替により変圧器 T_4 へ 96 [A]の負荷切替が行われて、全停電負荷は 288 [A]となる。ここで、変圧器 T_1 へ直接負荷切替を行う変圧器が存在しない。そこで、変圧器 T_3 から変圧器 T_5 へ一旦 125 [A]の負荷を切替えることにより、変圧器 T_3 の余裕容量を増加させる。その後で、変圧器 T_1 の負荷 86 [A]を変圧器 T_3 へ切替えると、全停電負荷が 202 [A]となる。このとき、変圧器 T_1 とブスタイCBを介して連結している変圧器 T_2 の余裕容量は 267 [A]である(表2. 1参照)。そこで、最後に、この両変圧器間のブスタイCBを投入することによって、変圧器 T_1 の全停電負荷が変圧器 T_2 へ切替えられて復旧が完了する。以上のスイッチ・オペレーションに要するCPU時間は 0.408秒である。

この例のように、事故変圧器とブスタイCBを介して連結している変圧器を”救援変圧器”と呼ぶことにしよう。従って、事故時負荷切替においては事故変圧器ばかりでなくこの救援変圧器の負荷切替が必要となる。そのため、表6. 1に示す事故変圧器 T_4 、 T_7 および T_{10} の場合には、それぞれ、対応する救援変圧器 T_3 、 T_8 および T_9 の負荷を他の変圧器に切替えている。この中で、変圧器 T_4 のように、事故変圧器とブスタイCBを介して連結している変圧器が複数個ある場合には、できるだけ少ない負荷切替で事故復旧を行う立場から最大の余裕容量を有する変圧器を救援変圧器として選んでいる。例えば、変圧器 T_4 は変電所B内にある変圧器 T_3 、 T_5 および T_6 の中で最大の余裕容量 (461 [A]) を有する変圧器 T_3 を救援変圧器としている。なお、以上の事故復旧に要するCPU時間は多くとも 1.0 秒である。

また、ここでは、事故の中でも最も苛酷な変圧器事故の場合を考察したが、配電線事故の場合には、その事故区間を事故変圧器と考えることにより本アルゴリズムを適用することができる。

以上の数値計算結果はここで提案する負荷切替アルゴリズムの妥当性および実用性を検証している。

6.8 まとめ

本章では、区間負荷が測定されているという条件の下で、変圧器容量および線路容量の制約を付した、組織的で実用的な事故時負荷切替方法を提案した。まず、ループスイッチを固定し、カットスイッチの開放位置変更を分岐点の直前のスイッチ開放位置までに限定すると、負荷切替問題は、応援変圧器をソース、停電となっている健全区間をシンクとするネットワークのネットワークフロー問題として定式化できることを示した。次に、このネットワークフロー問題が一種の部分和问题となっていることに着目して、部分和问题の近似解法を応用した”基本的な負荷切替アルゴリズム”を提案した。そして、この基本的な負荷切替アルゴリズムによって得られた解を、より厳密なものとするため応援フィーダ間の負荷置換を行う”区間負荷の置換を含むアルゴリズム”を提案した。更に、それまで固定されていたループスイッチの開放位置を調整することにより、負荷切替量を増加させ得ることを示し、”ループスイッチに関するアルゴリズム”を提案した。これらの負荷切替アルゴリズムを、順次指定された供給変圧器をソースとして、全停電区間が復旧されるまで繰返し適用する。負荷切替の途中において複数のカットスイッチが一つの分岐点の直前の開放位置で開放されている場合には、最大の最小余裕容量を有するカットスイッチの開放位置を、その分岐点を越えた開放位置に変更する。また、容量制約違反が発生するようならば、制約違反解消のための仮想的なシンクおよびソースを設けたネットワークを作成して、そのネットワークにこの負荷切替アルゴリズムを適用することにより、事前に制約違反を解消する。最後に、これらのアルゴリズムをソフトウェアとして具体化し、第2章で説明した実規模システムに適用して、その妥当性および実用性を検証した。

本アルゴリズムの特徴を以下に要約しておく。

- (i) 変電所間の物理的距離または対象としている配電システムの特徴等から、あらかじめ応援変圧器を指定できる。
- (ii) アルゴリズムが簡潔で段階的に構成されているため、利用する計算機の処理能力に応じてアルゴリズムを取捨選択することができる。

第 7 章

電圧降下および容量制約を考慮した
事故時負荷切替

第7章 電圧降下および容量制約を考慮した事故時負荷切替

7.1 概要

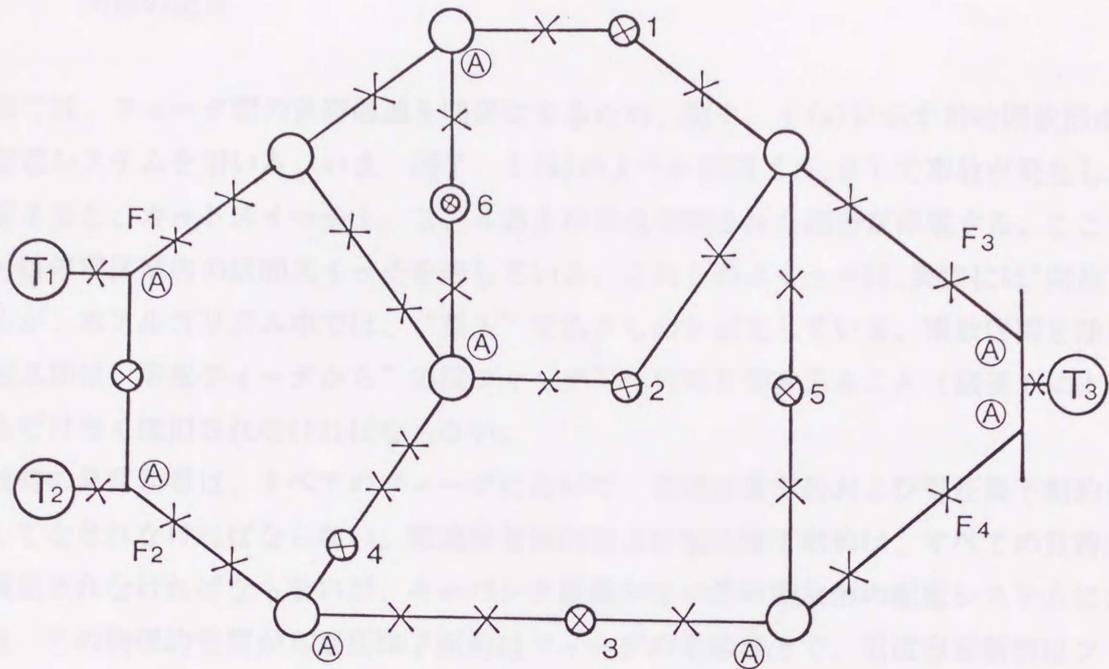
前章では、容量制約を考慮した事故時負荷切替の近似解法について述べた。しかし、この手法では、まだ、(i)手法の簡単化のため、電圧降下制約が考慮されていない、(ii)時々不必要なスイッチ操作がなされる、(iii)ループスイッチの操作が十分にできない、(iv)そのため、結果の切替手順が時々運転員になじみのないものになってしまう、などといった点に十分な考慮がなされていなかった。そこで、本章では、これらの不十分な点を改良するため、双対有効勾配法(付録1参照)の概念を用いた事故時負荷切替の近似解法について提案する^{(48)~(59)}。

提案する手法の基本的な考え方は次のようなものである。まず、事故区間を除いた停電区間を、一旦、すべて隣接するフィーダへ切替えて復旧するものと仮定する。もし、ここで制約違反が発生しなければ、これで切替を完了できる。制約違反がある場合には、応援フィーダ側に制約違反が発生しない範囲で、制約違反の解消に効果が大きい負荷から順に応援フィーダ側に切替える(融通)手順を制約違反がなくなるまで繰返す。この融通の結果においても制約違反が残る場合には負荷遮断により違反を解消する。最後に、開放スイッチの開放位置微調整によって遮断負荷の復旧を試みる。このフィーダの選択および負荷遮断を行う際に、双対有効勾配法の考え方に基づいた、いくつかの選択基準を用いる。以上の操作は、単に計算機シミュレーションで行い、実際のスイッチ操作はすべての負荷切替パターンが求められた後に、制約違反が発生しないようにまとめて行われる。

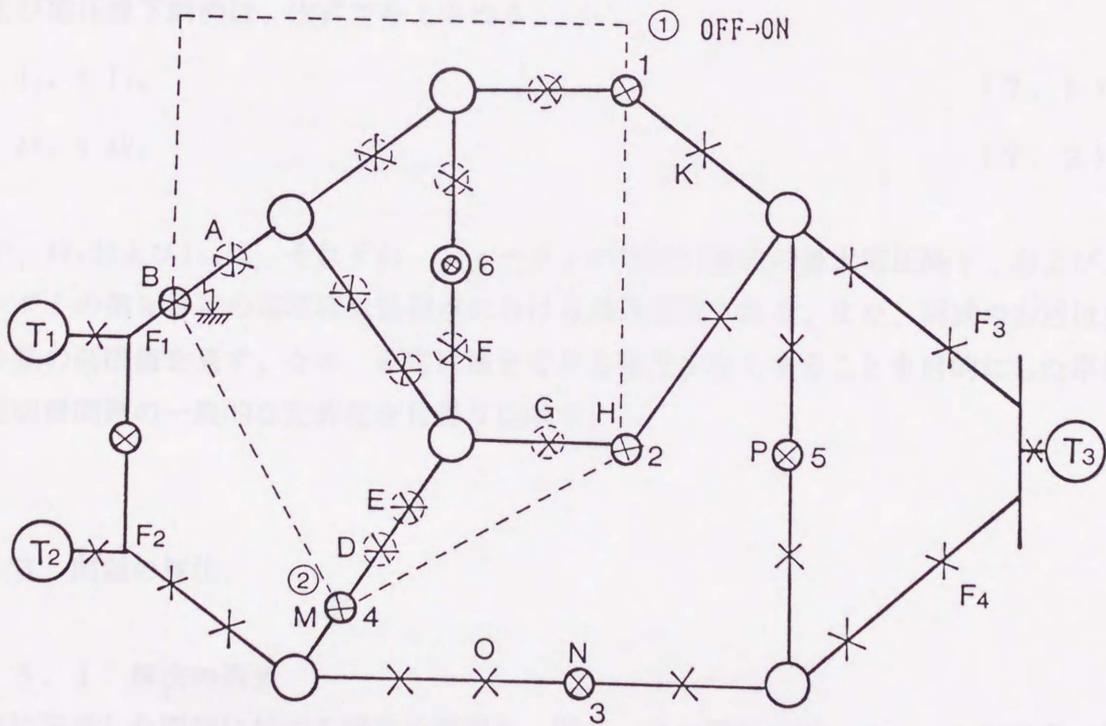
本手法の特長は、(i)制約違反量の減少に最も効果があるスイッチ操作だけが実施され無駄なスイッチ操作がない、(ii)従って、運転員になじみのある負荷切替手順が得られる、(iii)応援フィーダの優先順位を考慮できる、(iv)停電負荷が小さい時には高速に解が得られる、(v)ループスイッチの操作も十分に考慮できる、などである。

以下では、まず、電圧降下および容量制約を考慮した事故時負荷切替問題について記述し、次に、解法の基本的な考え方および解法アルゴリズムの詳細について説明する。そして、最後に、実規模システムへの本アルゴリズムの適用例を紹介して、第6章で述べたアルゴリズムによる結果と比較して、その有効性を検証する。

なお、本章では、主としてフィーダ単位の融通を考えるため、フィーダ引出口を根とする根付き木を用いる。



(a) 平常状態



(b) 緊急状態

図7. 1 平常状態および緊急状態のモデルシステム

7. 2 問題の記述

本章では、フィーダ間の負荷融通を明確にするため、図7. 1 (a)に示す常時開放形ループ配電システムを用いる。いま、図7. 1 (b)のように区間(A, B)で事故が発生したと仮定すると、カットスイッチ1, 2, 4およびB点で囲まれた部分が停電する。ここで、記号⊗は停電区域内の区間スイッチを表している。これらのスイッチは、実際には“開放”であるが、本アルゴリズム中では、“投入”であるものと仮定している。事故区間を除いた停電区間は、事故フィーダから“応援フィーダ”へ負荷を切替えること(融通)によりできるだけ多く復旧されなければならない。

事故時の負荷切替は、すべてのフィーダにおいて、電流容量制約および電圧降下制約を満足してなされなければならない。電流容量制約および電圧降下制約は、すべての負荷区間で満足されなければならないが、キャパシタ設備がない常時開放形の配電システムにおいては、その物理的性質から電圧降下制約はフィーダの末端部分で、電流容量制約はフィーダ引出口および配電線の線径が変化する分岐線の根元で監視すれば十分である。図7. 1 (a)の例では、電圧降下は、開放スイッチの両側で、電流容量は、Ⓐ印で示した点で監視される。

以上を考慮に入れると、フィーダ*i*の、第*k*番目の電流容量監視点における電流容量制約および電圧降下制約は、次式で与えられる。

$$I_{ik} \leq \bar{I}_{ik} \quad (7. 1)$$

$$\Delta V_i \leq \bar{\Delta V}_i \quad (7. 2)$$

ここで、 ΔV_i および I_{ik} は、それぞれ、フィーダ*i*の供給区域内の最大電圧降下、および、フィーダ*i*の第*k*番目の電流容量監視点における通過電流である。また、両式の右辺は対応する量の制限値を表す。なお、停電区域をできる限り少なくすることを目的にした事故時負荷切替問題の一般的な定式化を付録5に示す。

7. 3 問題の解法

7. 3. 1 解法の概要

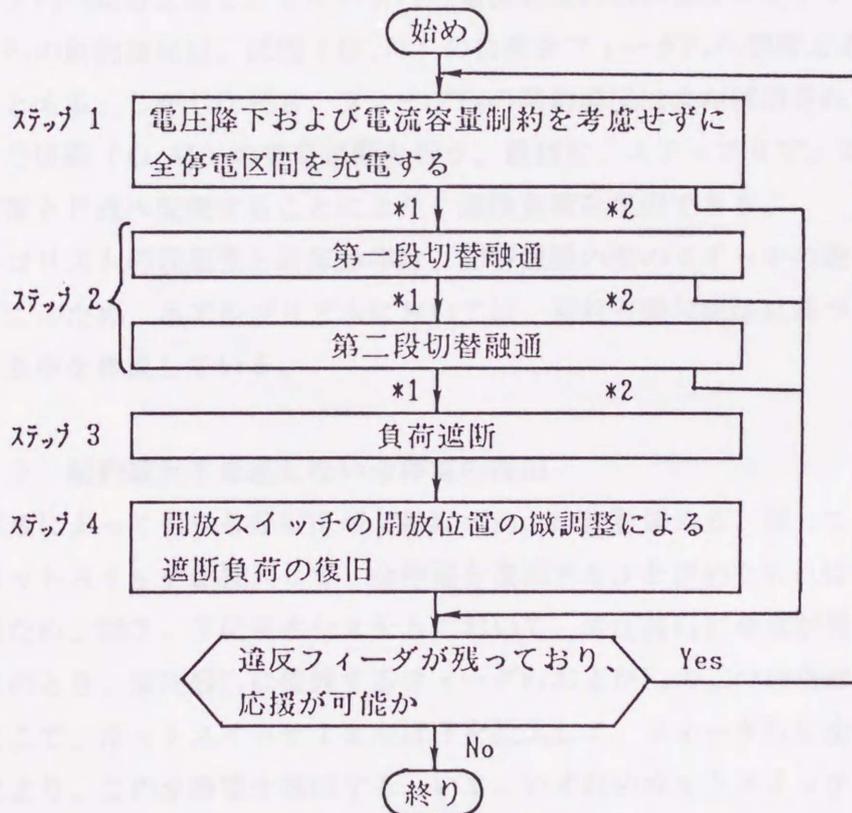
前節に記述した問題に対する解法の概要を、図7. 2の概略フローチャートに示す。停電している区間負荷は、基本的には、次のステップ1~4の手続きによって復旧され得る。これらの手続きを行う際には、事故の起こる前に投入されていた区間スイッチは、計算機内部では投入されているものとして扱っている(但し、事故区間両端のスイッチは除く)。

【ステップ1】全停電負荷を、それに接続するブスタイCBまたは区間スイッチを、制約違反を考慮せずに、投入して充電する。このとき、負荷融通を行ったフィーダに制約違反が発生しなければ終了する。そうでなければ、そのフィーダを違反フィーダとして、ステップ2へ行く。

【ステップ2】(a)第一段切替融通、(b)第二段切替融通の順に違反フィーダに融通し、制約違反解消を試みる。いずれかの融通で制約違反が解消されたならば終了する。そうでなければ、ステップ3へ行く。

【ステップ3】負荷遮断を行う。

【ステップ4】開放スイッチの開放位置の微調整を行って遮断負荷の再復旧を試みる。



*1:制約違反が残っている場合
*2:すべての制約違反が解消された場合

図7. 2 解法の概略フローチャート

以上の基本的な四つのステップを、図7. 1 (b)に示すシステムを用いて説明しよう。いま、区間(A, B)に事故が発生したとすると、この区間がシステムから除去されるため、破線で囲まれる区域が停電となる。

まず、ステップ1において、例えば、カットスイッチ1が投入されて、全停電負荷をフィーダ F_3 に切替える。このとき、制約違反が発生しなければ、ここで終了する。この点为本アルゴリズムの一つの特長である。多くの場合は制約違反が発生するので、ここでは区間(G, H)のH点に電圧降下の制約違反が発生すると仮定しよう。すなわち、フィーダ F_3 が違反フィーダとなる。そこで、ステップ2において違反フィーダ F_3 の負荷を他のフィーダへ二段階で切替えることを試みる。まず、第一段切替融通で、例えば、フィーダ F_2 への切替が試みられる。このとき、区間(M, D)の負荷のみが、フィーダ F_2 に新たな制約違反を発生させることなく、フィーダ F_2 へ切替えることができたが、フィーダ F_3 の制約違反は解消されていないとしよう。そのため、第二段切替融通で、区間(D, E)の負荷をさらにフィーダ F_2 へ切替えると、フィーダ F_2 の電流容量の制約違反が発生するとしよう。このフィーダ F_2 の制約違反は、区間(O, N)の負荷をフィーダ F_4 へ切替えることにより、解消できるとする。しかしながら、フィーダ F_3 の制約違反はまだ解消されていないので、ステップ3で区間(G, H)の負荷遮断を行う。最後に、ステップ4で、ループスイッチ6の開放位置をF点へ変更することにより、遮断負荷を復旧できる。

このアルゴリズムの収束性と計算効率は、切替融通の際のスイッチの選択方法に大きく依存する。このため、本アルゴリズムにおいては、双対有効勾配法に基づいた、種々のスイッチ選択基準を作成している。

7. 3. 2 制約違反を考慮しない全停電の復旧

一般に事故によって生じる停電区域(停電の島)は複数個ある。従って、どの停電区域の、どのカットスイッチを投入して、全停電を復旧するかを決めなければならない。そこで、簡単のため、図7. 3に示すシステムにおいて、変圧器 T_2 に事故が発生した場合を考えよう。このとき、変圧器 T_2 に接続するフィーダ F_2 および F_3 の二つの供給区域が停電の島となる。ここで、カットスイッチ1または3を投入して、フィーダ F_1 に全停電負荷を切替えることにより、この全停電を復旧する。いま、いずれのカットスイッチを投入してもフィーダ F_1 に制約違反が発生するものとしよう。このような場合には、以下に述べる基準に従って、一つのカットスイッチを選択する。

まず、フィーダの制約違反をベクトルで表し、これを“違反ベクトル”と呼ぶことにする。この違反ベクトルの各要素は対応する制約の違反量を示している。すなわち、 k 番目の停電区域が j 番目のカットスイッチを投入することによって充電されたとき、二つの制約違反、例えば、電圧降下および電流容量、が発生したとすると、違反ベクトル R_{kj} は二次元で表現され、その要素は(7. 3)式で表される(図7. 4参照)。

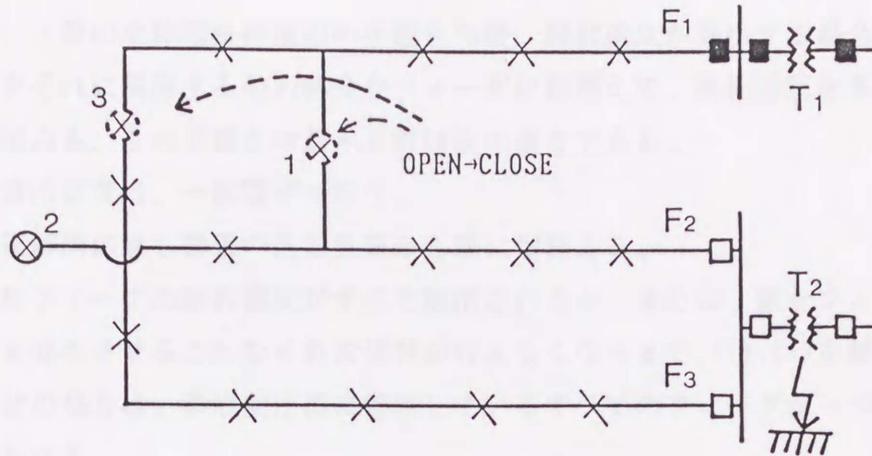


図7. 3 制約を考慮しない全停電の復旧

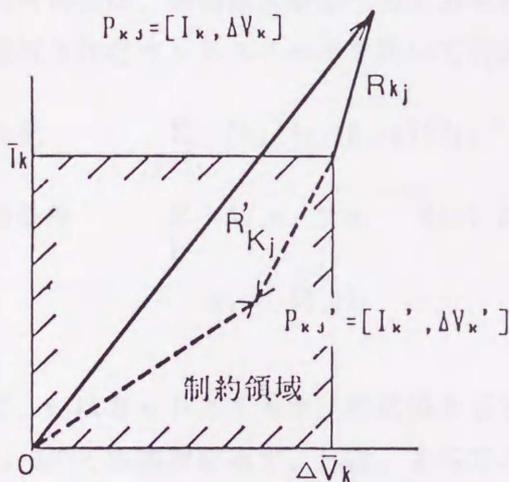


図7. 4 制約違反量

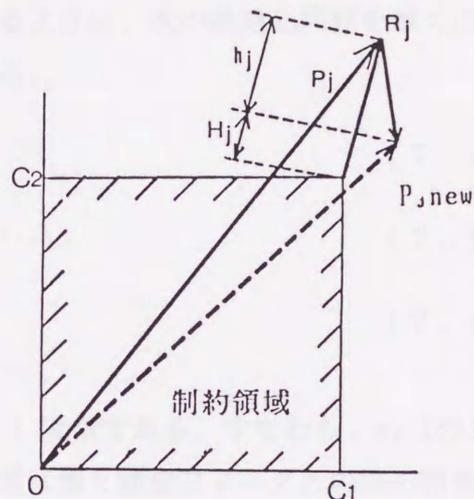


図7. 5 効果的な制約違反量の減少

$$R_{kj1} = \Delta V_k - \bar{\Delta V}_k, \quad R_{kj2} = I_k - \bar{I}_k \quad (7.3)$$

もし、制約違反が発生しないときは（図7. 4の R_{kj}' の場合）、対応する R_{kj} の要素は負であるが、ここでは、制約違反量のみを表現したいので、要素が負である場合には0とする。従って、制約が満足されている場合に限り、 $R_{kj}=0$ である。以上のことから、フィーダの制約違反を違反ベクトルのノルムによって、定量的に表すことができる。そこで、制約違反を考慮しない全停電復旧時のカットスイッチの選択基準を以下のように定める。

【制約違反を考慮しない全停電復旧時のカットスイッチの選択基準】

$a_j |R_{kj}|$ を最小にする、 k 番目の停電区域の j 番目のカットスイッチを投入して、全停電区間を復旧する。ただし、 $|R_{kj}|$ は違反ベクトル R_{kj} のノルムを示す。また、 a_j はカットスイッチ j により違反フィーダへ融通する場合の優先順位を示す重み係数である。

7.3.3 隣接フィーダからの融通による制約違反の解消

第7.3.2節の全停電負荷復旧の手続きの後、制約違反が発生する場合には、違反フィーダの負荷をそれに隣接する他の健全なフィーダに切替えて、制約違反を多段階的に解消することを試みる。この手続きの基本方針は次の通りである。

- (i) 負荷の切替は、一区間ずつ行う。
- (ii) 違反解消に最も効果のある負荷から順に切替える。
- (iii) 違反フィーダの制約違反がすべて解消されるか、または、健全フィーダに新たな違反を発生させることなく負荷切替が行えなくなるまで (i), (ii) を繰返す。

変圧器事故の場合は、事故変圧器に接続しているすべてのフィーダが一つの違反フィーダとして扱われる。

(a) 第一段切替融通

負荷切替は、制約違反解消に最も効果のあるように、次の最適化問題を解くことによって選択されたカットスイッチを用いて行われる。

$$\text{最大化} \quad \sum_{j \in I_b} [h_j / \{a_j (\Pi_j + \epsilon)\}] y_j \quad (7.4)$$

$$\text{制約条件} \quad \sum_j A_{ij} y_j \leq c_i \quad (i=1, 2, \dots) \quad (7.5)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad (7.6)$$

ここで、 y_j はカットスイッチ j の状態を示す 0-1 変数である。すなわち、 $y_j=1$ のとき投入、 $y_j=0$ のとき開放を示す。 I_b は、すべての停電区域と健全フィーダとの間の開放スイッチの集合である。また、 h_j は制約違反解消量を、 Π_j は残った制約違反量を示しており、制約が二個しかない場合には、二次元で図7.5のように表すことができる。もし、負荷切替によってフィーダの制約違反が解消されたときは $\Pi_j=0$ と定義する。 ϵ はゼロ割りを防ぐための係数であり、 a_j は応援フィーダの優先順位である。(7.5)式は、スイッチ j の切替操作に関する応援フィーダの電流容量と電圧降下の制約を一般的に表現したものである(付5.2式~付5.4式参照)。(7.4)式~(7.6)式で表される問題は組合せ問題となっているため、双対有効勾配法により近似解を得ている。すなわち、

$$h_j / a_j (\Pi_j + \epsilon) \quad (7.7)$$

の値を最大にするカットスイッチを一個ずつ選ぶ。このアルゴリズムを図7.6に示す。

この手続きは、違反フィーダの制約違反が解消されるか、あるいは、新たな制約違反を発生させることなく、応援可能なフィーダがなくなるまで、繰返される。

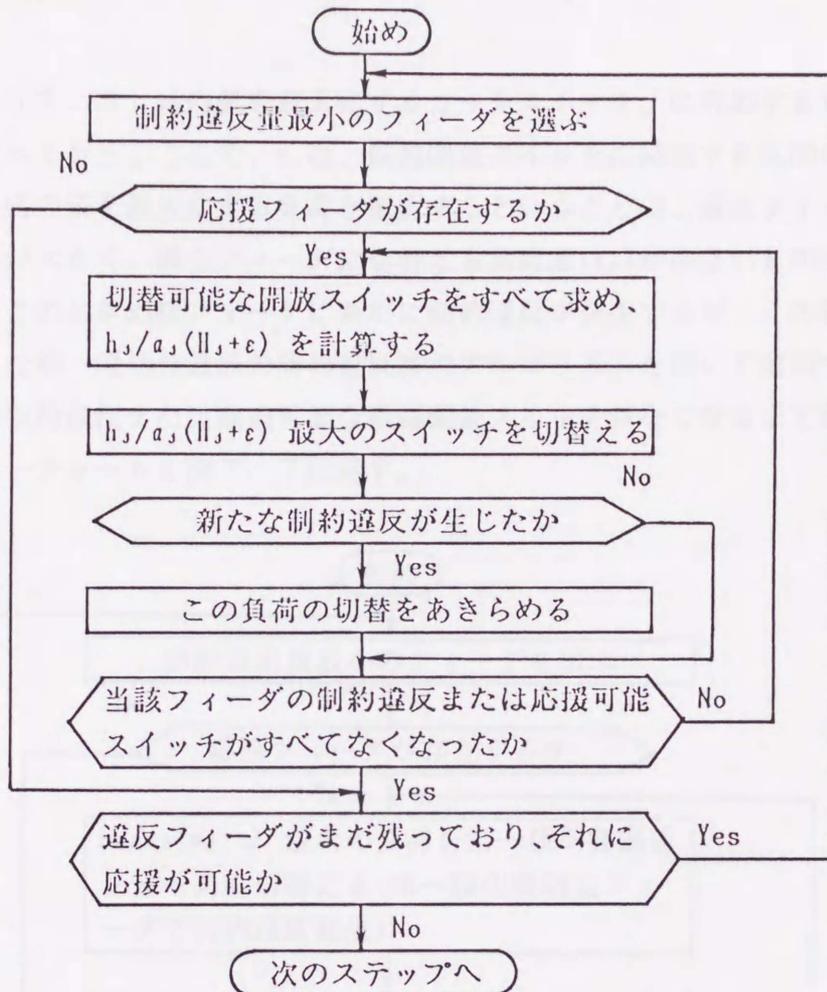


図7.6 第一段切替融通

(b)第二段切替融通

第一段切替融通で制約違反が残っている場合には、違反フィーダの負荷を一区間でも健全フィーダに切替えると、健全フィーダで制約違反が生じるという状態になっている。そこで、第二段切替融通手続きでは、違反フィーダと健全フィーダとの境界にある開放スイッチを制約を無視して一区間切替え、そのとき健全フィーダに新たに生じた制約違反をそのフィーダのさらに外側にある健全フィーダへの負荷切替操作によって解消する。本手続きの詳細なアルゴリズムは以下のようなものである（図7.7参照）。

すなわち、複数の違反フィーダがあるときは、制約違反量が最小の違反フィーダから順に融通することにする。制約違反解消のための負荷切替は、まず、選択されたフィーダに接続する各候補開放スイッチから、一区間、負荷(a_j)を切替えた時の違反フィーダの制約

違反量に関して、

$$h_j/a_j(a_j+\epsilon)$$

(7.8)

の値を計算し、(7.8)式の値を最大にするカットスイッチjに対応する負荷(a_j)を切替えることによって行う。ここで、 a_j は、候補開放スイッチに隣接する区間の負荷量である。(7.8)式の値を最大にする負荷を選択するということは、違反フィーダの制約違反の減少量(h_j)が大きく、健全フィーダに切替える負荷量(a_j)が小さいものを選択することを意味する。このとき応援フィーダに新たに制約違反が発生するが、この制約違反は、図7.6に示した第一段切替融通の制約違反解消アルゴリズムを用いて解消する。本手続きは、すべての制約違反または融通可能な候補開放スイッチがなくなるまで繰返される。本手続きのフローチャートを図7.7に示す。

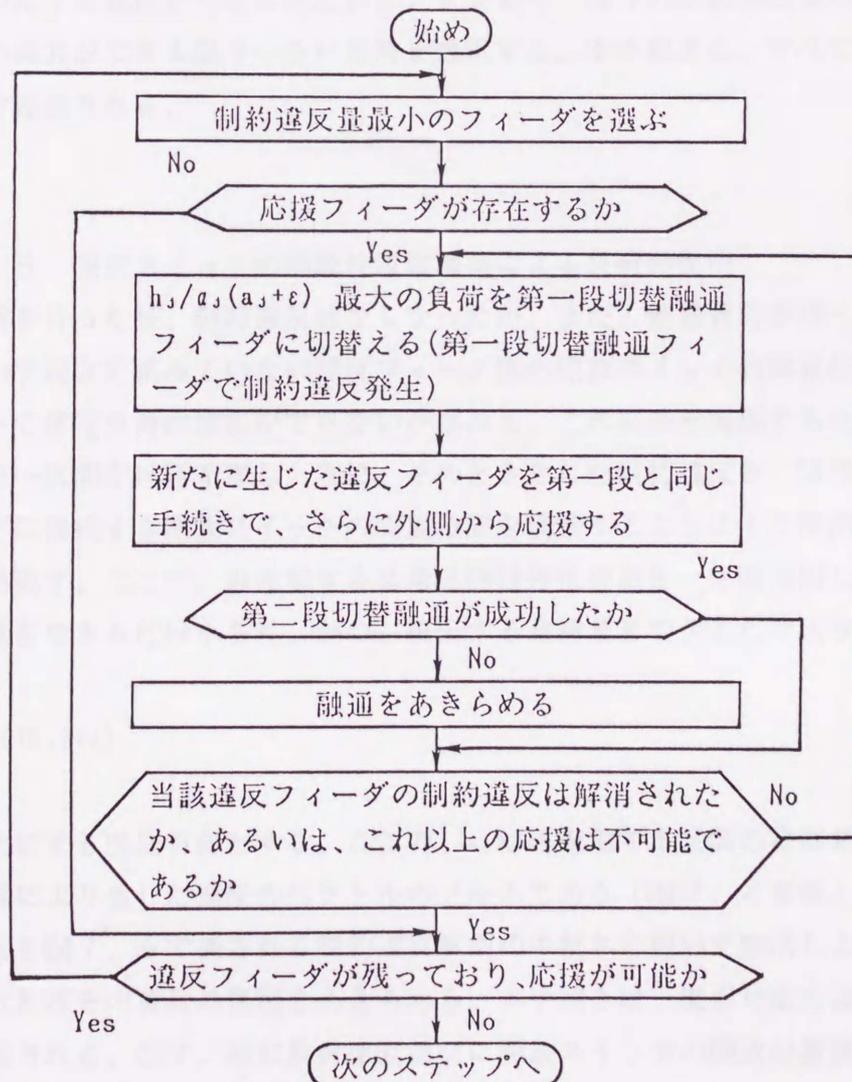


図7.7 第二段切替融通

(c)多段切替融通

理論的には、第三段または第四段まで多段融通することも可能であるが、配電システムは一般に単一の事故の場合、第二段までの融通で違反が解消できるように設計されているので、第二段までの融通しか考えないものとする。

7. 3. 4 負荷遮断

第二段までの融通を行ってもまだ制約違反が残っている場合には、違反フィーダの末端から負荷を遮断する。但し、負荷切替前に停電していなかった負荷については遮断しない。遮断する負荷は、上記の候補のうち、

$$a_j (H_j + \epsilon) \quad (7.9)$$

の値を最小にする負荷から順に選ばれる。すなわち、残りの制約違反量(H_j)と遮断する負荷量(a_j)の両方ができる限り小さい負荷を選択する。本手続きは、すべての制約違反がなくなるまで繰返される。

7. 3. 5 開放スイッチの開放位置微調整による負荷の復旧

負荷遮断を行った後、制約違反はなくなったが、まだ、停電負荷が残っている。そこで、現在までの手続きで試みていない違反フィーダ間の開放スイッチの開放位置の移動を行うことによって停電負荷の復旧ができないか試みる。この試みを実現するため、まず、遮断した負荷を一区間だけ再充電し、次に、そのとき生じた制約違反を、隣接するかつての違反フィーダに接続する開放スイッチの開放位置を調整することにより解消できないか調べることを繰返す。ここで、再充電する負荷区間は停電負荷を一区間復旧したときに生じる制約違反量をできるだけ小さく、かつ、復旧する負荷量をできるだけ大きくするために、

$$a_j / (|R_j| + \epsilon) \quad (7.10)$$

の値を最大にする区間負荷とする。ここで、 a_j は再充電する区間の負荷量、 $|R_j|$ は負荷区間の再充電により生じた違反のベクトルのノルムである(図7.4参照)。この時発生する制約違反を図7.6で表される制約違反解消の手続きを用いて解消しようと試みる。解消できなければその負荷の復旧をあきらめる。本手続きは、復旧可能な遮断負荷がなくなるまで繰返される。図7.8に負荷遮断並びに開放スイッチの開放位置微調整による遮断負荷復旧のフローチャートを示す。

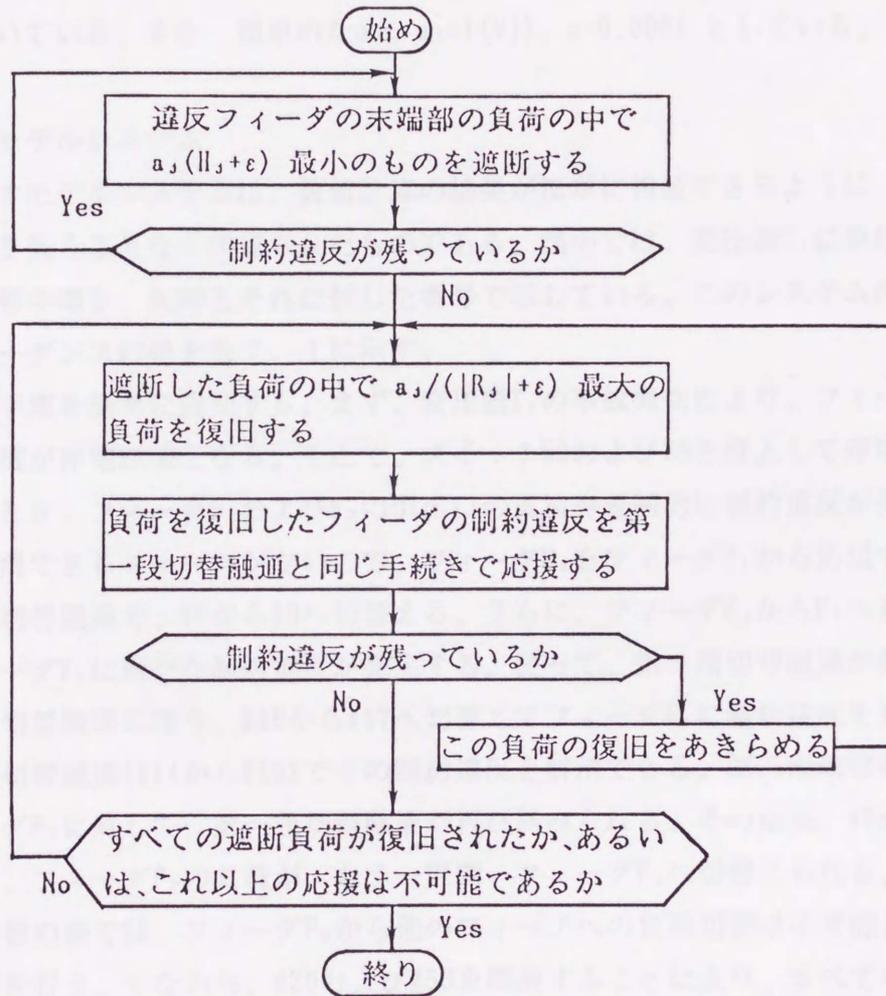


図7.8 負荷遮断および遮断負荷の復旧

7. 4. 数値例と考察

本章では、以上のアルゴリズムを二通りのシステムに適用した数値例を示す。すなわち、まず、本アルゴリズムの理解を深めるために、図7. 9に示す簡単なモデルシステムを用いた数値例を示す。次に、第2章で述べた実規模システムに適用した数値例により、本アルゴリズムの有効性と実用性を示す。利用した計算機はHITAC M-680/H(ギブソンミックス値 32ns)である。なお、本計算においては、事故後、数時間(例えば、4時間)の最大予測区間負荷を用いている。また、簡単のため、 $a_j=1(V_j)$ 、 $\varepsilon=0.0001$ としている。

7. 4. 1 モデルシステム

図7. 9に示すモデルシステムは、数値計算の結果が簡単に検証できるように、配電システムの一般性を失うことなく作成されたものである。図中では、変圧器 T_1 に事故が起きた場合の負荷切替手順を、矢印とそれに付した番号で示している。このシステムの区間負荷およびインピーダンスの値を表7. 1に示す。

以下に、切替手順を簡単に説明する。まず、変圧器 T_1 の事故発生により、フィーダ F_5 および F_6 の供給区域が停電区域となる。そこで、スイッチ50および28を投入して停電区域を充電する。そのとき、フィーダ F_3 および F_2 の引出口の電流容量制約に制約違反が発生する。フィーダ F_3 を応援できるフィーダがないので、フィーダ F_2 をフィーダ F_1 から応援する。すなわち、第一段切替融通で、#8から#9へ切替える。さらに、フィーダ F_2 から F_1 へ負荷を切替えると、フィーダ F_1 に新たな制約違反が発生する。従って、第一段切替融通が終了する。そこで、第二段切替融通に移り、#16から#17へ切替えてフィーダ F_1 に制約違反を発生させた後で、第一段切替融通(#14から#15)でその制約違反を解消できる。第二段切替融通の後で、違反フィーダ F_2 に対して、第一段切替融通が再び試みられる。その結果、#9から#10へ切替えられて、フィーダ F_2 の負荷が、もう一区間、フィーダ F_1 へ切替えられる。

以上の負荷切替の後では、フィーダ F_2 から他のフィーダへの負荷切替は不可能となったので、負荷遮断を行う。すなわち、#20および#53を開放することにより、すべての制約違反が解消される。このとき、フィーダ F_2 (F_5)の遮断負荷は、#20を投入することにより復旧されるが、フィーダ F_2 に制約違反が発生する。この制約違反は、フィーダ F_2 と F_3 との間のカットスイッチの開放位置の移動により、再び解消される。すなわち、#37から#36へ切替える。以上で、変圧器 T_1 の事故時負荷切替は完了する。

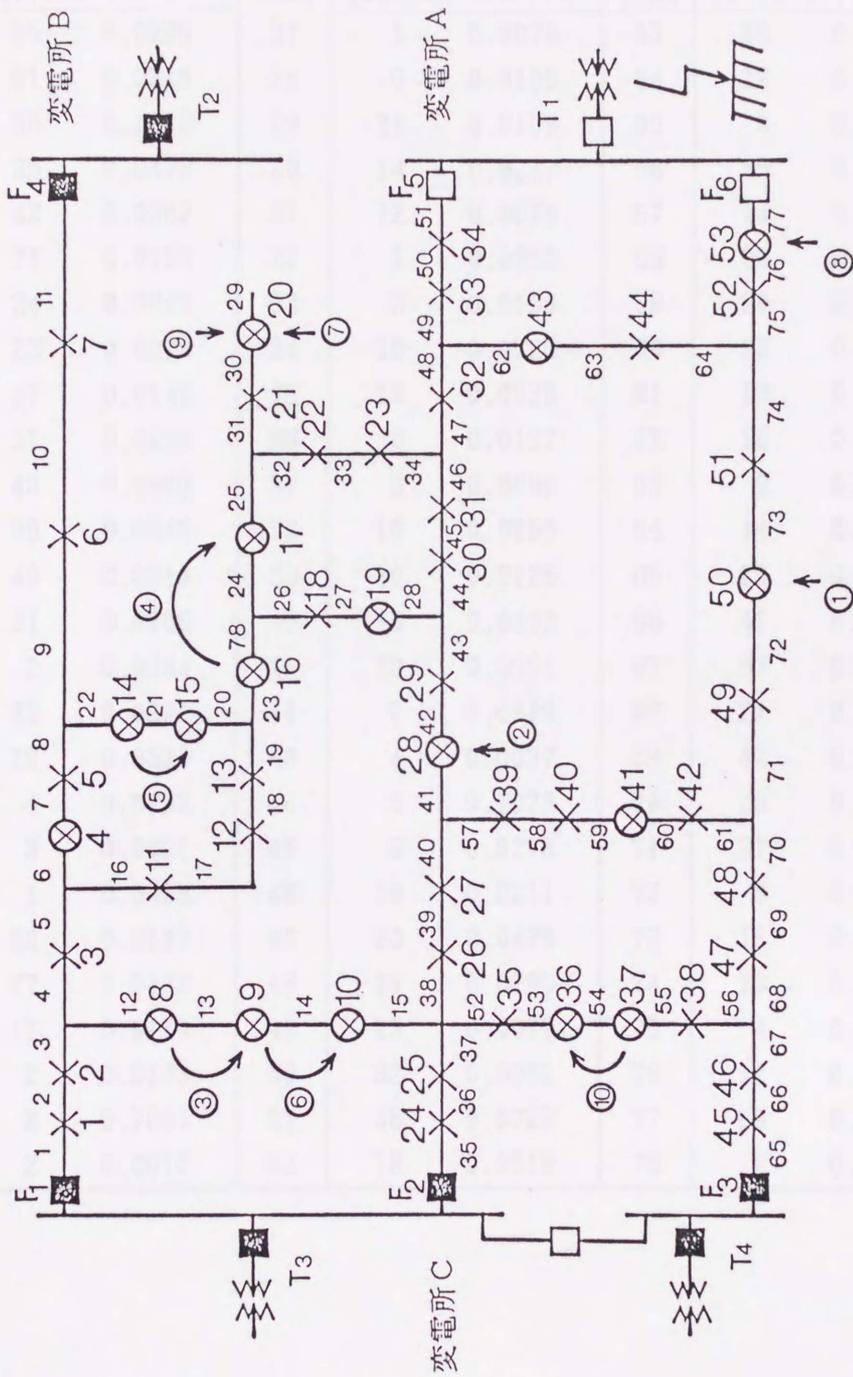


図7.9 モデルシステムの負荷切替手順

表7. 1 モデルシステムの区間負荷とインピーダンス

区間	負荷[A]	インピーダンス	区間	負荷[A]	インピーダンス	区間	負荷[A]	インピーダンス
1	25	0.0205	27	1	0.0078	53	15	0.0723
2	51	0.0315	28	6	0.0109	54	13	0.0174
3	36	0.1040	29	21	0.0109	55	8	0.0423
4	35	0.0473	30	14	0.0247	56	25	0.1329
5	43	0.0362	31	12	0.0625	57	14	0.1654
6	71	0.0153	32	1	0.0055	58	22	0.1792
7	34	0.0947	33	3	0.0139	59	30	0.1218
8	23	0.0079	34	10	0.0725	60	22	0.1111
9	37	0.0142	35	18	0.0839	61	13	0.0721
10	51	0.0239	36	10	0.0127	62	16	0.0651
11	48	0.0560	37	3	0.0666	63	9	0.0325
12	30	0.0843	38	10	0.0266	64	14	0.0673
13	40	0.0010	39	10	0.0125	65	25	0.0721
14	21	0.0205	40	12	0.0100	66	41	0.0125
15	2	0.0384	41	20	0.0551	67	67	0.0117
16	23	0.0925	42	2	0.0949	68	21	0.0432
17	29	0.0529	43	4	0.0037	69	42	0.0739
18	4	0.0382	44	5	0.1029	70	20	0.0202
19	3	0.0621	45	8	0.0278	71	31	0.0315
20	1	0.0823	46	10	0.0211	72	8	0.0010
21	52	0.0127	47	20	0.0476	73	15	0.0128
22	27	0.0237	48	25	0.0799	74	29	0.0256
23	11	0.0113	49	23	0.0072	75	4	0.0119
24	2	0.0179	50	32	0.0061	76	12	0.0076
25	8	0.2001	51	48	0.0723	77	59	0.0529
26	2	0.0012	52	18	0.0619	78	2	0.0100

7.4.2 実規模システム

実規模システムにおいて、四つの変圧器事故を仮定し、本アルゴリズムおよび第6章のアルゴリズムを適用して数値計算を行った。これらの結果の比較を、表7.2および表7.3に要約している。まず、表7.2から、すべての場合において、本アルゴリズムの方が、スイッチ切替回数が大幅に少なくなっていることが分かる。(計算時間の減少はデータ構造の改良によるところが大である。)更に、本アルゴリズムの方が、変圧器 T_1 および T_4 を除いて、切替負荷量が少ない。そこで、変圧器 T_1 の事故の場合の負荷切替過程を詳細に見ると(表7.3参照)、本アルゴリズムの場合には、最後の切替融通において極端に大きな区間負荷(178[A])が選択されているためであることが分かる。

以上の結果から、本アルゴリズムのほう第6章のアルゴリズムよりも、ほとんどの場合について、優れていることが検証された。特に、本アルゴリズムにおいては、制約違反解消の際には、組合せ計算をしないで、より効果的な負荷切替が行われるため、スイッチ切替回数が減少していることが特長である。

表7.2 本手法と第6章の手法による計算結果の比較

	本手法による結果				第6章の手法による結果			
	T_1	T_4	T_7	T_{10}	T_1	T_4	T_7	T_{10}
停電変圧器								
停電負荷 [A]	772	1697	1258	924	772	1697	1258	924
復旧負荷 [A]	884	1708	1262	927	837	1704	1312	1021
スイッチ切替回数	7	24	13	10	16	32	42	48
計算時間 [秒]	0.055	0.284	0.326	0.149	0.408	0.919	0.494	0.490

表7.3 変圧器 T_1 が事故の場合の計算結果の比較

T_r	T_t	本手法による結果			T_r	T_t	第6章の手法による結果		
		スイッチ切替回数	切替負荷[A]	停電負荷[A]			スイッチ切替回数	切替負荷[A]	停電負荷[A]
				772				772	
1	4	2	173	599	1	3	8	388	
1	5	1	86	513	1	4	3	96	
1	3	3	358	155	3	5	3	(124)	
1	2	1*	267	0	1	3	1	86	
					1	2	1*	267	
								0	

(T_r :事故変圧器, T_t :応援変圧器, *:ブスタイCB投入)

7. 5. まとめ

本章では、電圧降下および容量制約を考慮した、効率良い配電システムの事故時負荷切替アルゴリズムについて提案した。この配電システムの事故時負荷切替アルゴリズムについては、すでに第6章で提案したが、以下のような不十分な点があった。

- (i) 電圧降下が考慮されていない。
- (ii) 時々、不必要なスイッチ操作が行われる。
- (iii) ループスイッチの操作が不十分である。
- (iv) そのため、得られた切替手順が運転員になじみがないものになってしまう。

これらの不十分な点を改良するため、本章では双対有効勾配法の概念を用いた事故時負荷切替アルゴリズムを提案している。本アルゴリズムは以下のように要約される。まず、事故区間を除いた停電区間を、一旦、すべて隣接するフィーダへ切替えて復旧するものと仮定する。もし、ここで、制約違反が発生しなければ、これで切替を完了できる。制約違反が発生する場合には、応援フィーダ側に新たな制約違反が発生しない範囲で、双対有効勾配法の考え方にに基づき、制約違反の解消に効果が大きい負荷から順に応援フィーダ側に切替える。この切替融通操作を制約違反が解消するまで繰返す。この融通の結果においても制約違反が残る場合には、負荷遮断により制約違反を解消する。最後に、開放スイッチの開放位置の微調整によって遮断負荷の復旧を試みる。

最後に、本アルゴリズムをソフトウェアとして具体化し、第2章で示した実規模システムに適用して、第6章のアルゴリズムによる結果と比較することにより、その改良点を検証した。

本アルゴリズムの特長を以下に要約しておく。

- (i) 制約違反量の減少に最も効果的なスイッチ操作だけが行われるため、無駄なスイッチ操作がない。
- (ii) 従って、運転員になじみのある負荷切替手順が得られる。
- (iii) 応援フィーダの優先順位を考慮できる。
- (iv) 停電負荷が小さい場合には高速に解が得られる。
- (v) ループスイッチの操作も十分に考慮できる。

第 8 章

結 論

第8章 結 論

近年の経済安定成長および高度情報化という社会情勢の中で、電力に対する依存度はますます高くなり、生活文化の多様化および高度化と相俟って、電力の質的向上の要請が強くなっている。このような要請に応えるためには、電力会社としては、供給信頼度の向上および配電システムの効率的運用などの目的を達成するために配電自動化の必要に迫られている。このような背景から、本論文では、配電システムの区間スイッチ操作が自動化されつつあることに着目し、最適スイッチ・オペレーションの問題を数理計画問題として定式化し、高速な近似解法アルゴリズムにより実用的な計算時間内で解くソフトウェアを提案した。

各章毎の内容または得られた結果は、以下のように要約される。

(第1章) 序論

配電システムの、特徴、自動化の環境などを述べ、スイッチ・オペレーションの研究動向を概観して、本論文の位置づけを明確にした。

(第2章) 配電システムのグラフ的考察

緊密に連係した都市部の配電システムを計算機上で表現するために、配電システムをグラフで表現する方法を与えた。すなわち、配電システムはグラフ的には、変圧器またはフィーダを根、開放スイッチを葉、そして配電線を枝とする根付き木からなる森として表現された。このことから、スイッチ・オペレーションは木の拡大または縮小に対応することを明らかにした。この考え方は以降の各章において常に活用されている。また、本論文で提案されたアルゴリズムの妥当性と実用性を検証するために、しばしば引用される実規模配電システムを簡単に説明した。

(第3章) 変圧器およびフィーダの負荷分担均等化

(1) 二変圧器間の負荷切替をネットワークフロー問題として定式化し、この問題が一種の部分和问题になっていることに着目して、部分和问题の近似解法アルゴリズムを応用して

負荷切替の”基本的な計算方法”を作成した。

(2)この基本的な計算方法を繰返し二変圧器間に適用して、すべての変圧器間の負荷分担均等化を行うアルゴリズムを開発した。

(3)各変圧器に接続するフィーダに再び基本的な計算方法を適用してすべてのフィーダ間の負荷分担均等化を行うアルゴリズムを開発した。

(4)作業停電の配電システムにおいても、この変圧器およびフィーダの負荷分担均等化の計算方法が適用できることを示した。

(第4章) 制約がない場合の区間負荷測定

(1)任意区間の負荷測定は測定区間から木の末端方向の葉(カットスイッチ)の探索に帰着されることを示した。すなわち、カットスイッチの開放位置を測定区間の両端のスイッチ開放位置に、引き続いて、変更することによりその区間負荷を測定できることを示した。

(2)負荷測定のためのカットスイッチが求められない場合には、ループスイッチをカットスイッチにタイプを変更することにより負荷測定が可能であることを示し、そのアルゴリズムを開発した。

(3)供給区域全体の区間負荷測定は木を順次縮小することによって、すなわち、カットスイッチの開放位置をフィーダ引出口方向へ変更することによって、可能であることを示し、そのアルゴリズムを開発した。

(4)実規模システムを用いて、ここで提案している区間負荷測定アルゴリズムの妥当性を検証した。

(第5章) 制約がある場合の区間負荷測定

(1)区間負荷測定の途中において制約違反が発生した場合に、他のフィーダからの応援により制約違反を解消する方法を与えた。この制約違反の解消においては、有効勾配法の考え方を用いて、制約違反の解消に最も効率的なフィーダから順に選択し応援する方法を開発し、そのアルゴリズムを開発した。

(2)第4章の区間負荷測定アルゴリズムを応用して、任意区間および供給区域全体の区間の負荷測定アルゴリズムを提案した。

(3)ここで提案している区間負荷測定アルゴリズムを実規模システムに適用して、妥当性および実用性を検証した。

(第6章) 容量制約を考慮した事故時負荷切替

(1)二変圧器間の負荷切替問題をネットワークフロー問題として定式化した。この問題が部分和问题になっていることに着目し、部分和问题の近似解法アルゴリズムを応用した”基本的な負荷切替アルゴリズム”を作成した。

(2)この基本的な負荷切替アルゴリズムによって得られた解を改良するために、フィーダ間の区間負荷を置換するアルゴリズムを作成した。

(3)ループスイッチの開放位置を調整することにより、負荷切替量をさらに増加させるア

ルゴリズムを作成した。

(4)以上のアルゴリズムを総合して、“総合的な負荷切替アルゴリズム”を作成した。

(5)ここで提案している総合的な負荷切替アルゴリズムを実規模システムに適用して、本アルゴリズムの妥当性および実用性を検証した。

(第7章) 電圧降下および容量制約を考慮した事故時負荷切替

双対有効勾配法を用いた事故時の負荷切替アルゴリズムを開発し、実規模システムでその有効性・妥当性・実用性を検証した。このアルゴリズムは次のような手順よりなる。

(1)まず、制約を考慮しないで全停電を復旧することを試みる。全停電負荷が少ない場合には一挙に復旧できるので、高速に解を得ることができる。

(2)制約違反が発生して一挙に全停電が復旧できない場合には、隣接フィーダから第一段切替融通および第二段融通を行う。これらの切替融通は組合せ最適化問題として定式化され、双対有効勾配法によって近似解を求めている。

(3)第二段切替融通で制約違反が解消されない場合には、負荷遮断を行う。最後に、この遮断負荷復旧を開放スイッチの開放位置微調整により試みる。

このアルゴリズムの特長は次のようなものであり、実規模システム例により、従来法に比べて極めて有効であることを確認した。

- (i) 制約違反量の減少に最も効果的なスイッチ操作だけが行われるため、無駄なスイッチ操作がない。
- (ii) 従って、運転員になじみのある負荷切替手順が得られる。
- (iii) 応援フィーダの優先順位を考慮できる。
- (iv) 停電負荷が小さい場合には高速に解が得られる。
- (v) ループスイッチの操作も考慮できる。

本論文では、大規模配電システムにおけるスイッチ・オペレーションの問題を、数理計画問題として定式化して、高速な近似解法アルゴリズムにより実用的な計算時間内で解く方法を与えた。他方において、配電自動化システムにおけるスイッチ・オペレーションの問題は、まだ、送電損失最小構成アルゴリズムなど多くの問題が残されている。本論文で述べた最適スイッチ・オペレーションに関するアルゴリズムは、配電自動化システム全体から見れば、狭い範囲を占めるにすぎないが、本論文が配電自動化の発展に対して一助となれば幸である。

謝 辞

本研究は、広島大学工学部 青木 兼一教授の御懇篤なる御指導と御教授により遂行されたものである。指導教授として長年に亙り公私共に多大な御指導を賜った青木 兼一教授に深甚なる感謝の意を捧げます。

本論文をまとめる上で、多くの御指導と御助言を賜った広島大学工学部 中前 栄八郎教授、翁長 健治教授、尾崎 俊治教授、佐々木 博司助教授に衷心より御礼申し上げます。

広島大学工学部 奈良 宏一助教授には、本研究遂行中、終始暖かい御指導と御助言を賜り、また、御厚情あふれる御激励を賜り、衷心より感謝致します。

広島大学工学部 佐藤 泰司助手には、しばしば研究室に同室させて頂き、忌憚のない御助言を賜り、また、暖かい御支援を賜りました。

大阪工業大学 一森 哲男助教授には、経営システム工学講座在職中に、多くの研究上の御指導と御支援を賜りました。

広島県立大学 金指 正和助教授、錦織 昭峰助教授、伊藤 雅講師、渡辺 展男講師には、多くの研究上の御助言を賜り、また、終始御鞭撻と御厚情あふれる御激励を賜りました。

広島大学工学部 経営システム工学講座 村上 義博技官、大学院生および学部学生の皆様には、終始変わらぬ暖かい御支援と御協力を賜りました。

近畿大学工学部 徳田 昭教授には、本研究遂行中、終始御鞭撻と御厚情あふれる御激励を賜りました。

近畿大学工学部経営工学科 教員の皆様には、御迷惑を御掛けしたにも拘わらず、終始変わらぬ暖かい御支援と御協力を賜りました。また、数理工学第二研究室の有志学生には、終始変わらぬ御協力を賜りました。

中国電力株式会社 配電部 佐藤 美幸部長、佐野 穰一課長、原田 知行課長代理には、配電システムに関する貴重な資料を提供して頂き、運用面について多くの示唆に富んだ御討論、御助言を賜りました。また、同社 技術研究所 北川 稔次長をはじめ、同研究所の皆様には、有益な御討論を賜りました。

以上の皆様に、衷心より、深甚なる謝意を表す次第です。

参 考 文 献

参 考 文 献

- (1) 特集「電力分野における自動化技術の最近の動向」 電気学会雑誌 第108巻,
第6号 昭和63年9月
- (2) K. Aoki, T. Ichimori and M. Kanezashi, "Normal State Optimal Load Allocation in Distribution Systems", IEEE Trans. PWRD, Vol. PWRD-2, No. 1, pp.147-155, January 1987
- (3) K. Aoki, T. Satoh, T. Ichimori, M. Kanezashi and H. Kuwabara: "Optimal Load Allocation in Power Distribution Systems", Proceedings of International Conference on Optimization Techniques and Applications, pp. 345-354, April 1987
- (4) 電気協同研究会編「配電設備の今後の工事・保守技術」 電気協同研究 第38巻,
第1号, 昭和57年9月
- (5) 青木、佐藤、伊藤、桑原、金指: 「電圧降下制約を考慮した配電系統の事故時負荷
切換方法」 電気学会論文誌B分冊, 第108-B巻, 第7号 pp.329-335,
昭和63年8月
- (6) K. Aoki, T. Satoh, M. Itoh, H. Kuwabara and M. Kanezashi: "Voltage Drop Constrained Restoration of Supply by Switch Operation in Distribution Systems", IEEE Trans. PWRD, Vol.3, No.3, pp.1267-1274, July 1988
- (7) Task Group on State of the Art Distribution System Design Working Group on Distribution System Design, Distribution Subcommittee, "Bibliography on Distribution Automation, 1969-1982", IEEE Trans. PAS, Vol.PAS-103, No.6, pp.1176-1182, June 1984

- (8) 山田、橋本、別府、大園、中西:「配電線電算機制御プログラムの開発(その1) - 配電系統事故処理操作論理プログラム -」電中研報告 174071、昭和50年5月
- (9) 橋本、山田、別府、大園、山本:「配電線電算機制御プログラムの開発(その2) - バンク事故を考慮した事故処理操作論理プログラム -」電中研報告 175071、昭和51年7月
- (10) 橋本、山田:「配電線電算機制御プログラムの開発(その3) - 短期負荷予測手法に関する検討 -」電中研報告 177058、昭和53年5月
- (11) 橋本、山田、松永:「配電線電算機制御プログラムの開発(その4) - 負荷予測機能を加えた事故処理操作プログラム -」電中研報告 178064、昭和54年8月
- (12) 橋本、松永:「配電線電算機制御プログラムの開発(その5) - 系統変更に伴うデータ処理および電力逆送プログラムの開発 -」電中研報告 179057、昭和55年9月
- (13) C. H. Castro, J. B. Bunch and T. M. Topka, "Generalized Algorithms for Distribution Feeder Deployment and Sectionalizing", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-99, No. 2, pp.549-557, March/April 1980
- (14) S. Kato, T. Naito, H. Kohno, H. Kanawa and T. Shoji, "Computer Based Distribution Automation", IEEE PICA San Francisco, May 1985
- (15) C. A. Castro Jr. and A. L. M. Franca, "Automatic Power Distribution Reconfiguration Algorithm Including Operating Constraints", IFAC Electric Energy Systems, Rio de Janeiro, 1985
- (16) D. T. Rizy, J. S. Lawler, J. B. Patton and N. H. Fortson, "Distribution Automation Applications Software for the ATHENS UTILITIES BOARD", IEEE 1988 PES Winter Meeting, 88 WM 097-8, 1988
- (17) C. E. Lin, Y. W. Huang, H. L. Chow and C. L. Huang, "A Distribution System Outage Dispatch by Data Base Method with Real-Time Revision", IEEE 1988 PES Winter Meeting, 88 WM 085-3, 1988

- (18) A. M. Stankovic and M. S. Calovic, " Graph Oriented Algorithm for the Steady-State Security Enhancement in Distribution Networks", IEEE 1988 PES Winter Meeting, 88 WM 102-6, 1988
- (19) 青木、梶原、佐藤、金指：「スイッチ操作による変圧器およびフィーダの負荷分担均等化の計算方法」電気学会論文誌B分冊，第107-B巻，第9号 pp. 433-440，昭和62年9月
- (20) K. Aoki, H. Kuwabara, T. Satoh and M. Kanezashi: " An Efficient Algorithm for Load Balancing of Transformers and Feeders by Switch Operation in Large Scale Distribution Systems", IEEE Trans. PWRD, Vol. 3, No. 4, pp.1865-1872, October 1988
- (21) 青木、梶原、金指、渡辺、錦織、佐藤、伊藤：「配電系統の負荷分担均等化の計算方法」電気学会電力技術研究会資料PE-87-57, pp. 135-144, 昭和62年7月
- (22) 青木、梶原、佐藤、村上、伊藤、玉川：「配電系統の負荷分担均等化の計算方法」昭和62年電気学会全国大会講演論文集、No. 1164
- (23) 青木、梶原、金指、佐藤、渡辺、日浦：「スイッチ操作による変圧器およびフィーダの負荷平滑化の計算方法」昭和61年電気四学会中国支部連合大会講演論文集、No. 050923
- (24) O. H. Ibarra and C. E. Kim, "Fast Approximation Algorithms for the Knapsack and Sum of Subset Problems", J.ACM, Vol.22, No.4, pp.463-468, October 1975
- (25) 今野、鈴木：「整数計画法と組合せ最適化」日科技連 昭和57年
- (26) 青木、佐藤、梶原、金指：「常時開放形ループ配電系統の負荷測定の基本的な計算方法」電気学会論文誌B分冊，第107-B巻，第5号 pp.237-243，昭和62年5月
- (27) 青木、梶原、金指、佐藤、梶原：「常時開放型ループ配電系統の負荷測定方法」電気学会電力技術研究会資料PE-86-67, pp. 151-160, 昭和61年8月

- (28) 青木、梶原、金指、佐藤、梶原：「常時開放型ループ配電システムの負荷測定方法」
昭和61年電気学会全国大会講演論文集、No. 1089
- (29) 青木、梶原、金指、佐藤、村上、梶原：「常時開放型ループ配電システムの負荷測定方法」 昭和61年電気四学会中国支部連合大会講演論文集、No. 050920
- (30) N.Christofides: "Graph Theory: An Algorithmic Approach" Academic Press, 1975
- (31) S. Evan: "Graph Algorithms" Computer Science Press, 1979
- (32) J. C. Lemoine and G. Caucheteux: "Theoretical Laws of the Development of Urban Distribution Systems", IEEE PES, Paper A 80 018-2, 1980
- (33) S.スヴォーリック：「コンピュータとデータ構造」 CQ 出版 昭和53年
- (34) 青木、梶原、奈良、佐藤：「電圧降下および容量制約を考慮した開閉器操作による配電システムの負荷測定」 電気学会論文誌B分冊，第109-B巻，第2号，pp.65-72，平成元年2月
- (35) K. Aoki, K. Nara, T. Satoh and H. Kuwabara: "Section Demand Data Management in Distribution Systems", Proceedings of International Symposium on Electricity Distribution & Energy Management, pp.29-34, October 1988
- (36) K. Aoki, K. Nara, T. Satoh, and H. Kuwabara: "An Algorithm for Section Load Measurement in Distribution Systems", Proceedings of 1988 KIEE Annual Conference International Sessions on Power Systems and Apparatus Optics and Quantum Devices, pp.84-88, November 1988
- (37) 青木、梶原、奈良、佐藤、金指：「電圧降下および容量制約を考慮した配電システムの区間負荷測定手法」
電気学会電力技術研究会資料PE-88-79，pp. 31-40，昭和63年7月
- (38) 青木、梶原、奈良、佐藤、伊藤、金指：「電圧降下および容量制約を考慮した配電システムの負荷測定手法（その2）」昭和63年電気学会全国大会講演論文集、No. 1000

- (39) 青木、奈良、錦織、佐藤、伊藤、四方、佐々木、梶原、金指、渡辺：「電圧降下および容量制約下における配電システムの負荷測定手法」
昭和62年電気四学会中国支部連合大会講演論文集、No. 040917
- (40) 豊田：「プロジェクト選択と有効勾配法」オペレーションズ・リサーチ、Vol. 32, No. 6 pp.329-334, 昭和62年6月
- (41) K. Aoki, H. Kuwabara, T. Satoh and M. Kanezashi: " Outage State Optimal Load Allocation by Automatic Sectionalizing Switches Operation in Distribution Systems", IEEE Trans. PWRD, Vol. PWRD-2, No. 4, pp.1177-1185, October 1987
- (42) 青木、一森、梶原、佐藤：「常時開放型ループ配電システムの事故時負荷切換え方法」電気学会電力技術研究会資料PE-85-116, pp. 187-197, 昭和60年7月
- (43) 青木、梶原、金指、佐藤、四方：「常時開放型ループ配電システムの事故時負荷切換え方式」電気学会電力技術研究会資料PE-86-69, pp. 171-181, 昭和61年8月
- (44) 青木、一森、熊野、梶原：「常時開放型ループ配電システムの事故時負荷切換え方法」昭和60年電気学会全国大会講演論文集、No. 1123
- (45) 青木、梶原、金指、佐藤、四方：「常時開放型ループ配電システムの事故時負荷切換え方法」昭和61年電気学会全国大会講演論文集、No. 1088
- (46) 青木、梶原、佐藤、村上：「常時開放型ループ配電システムの事故時負荷切換え方法（その1）」昭和60年電気四学会中国支部連合大会講演論文集、No. 030807
- (47) 青木、梶原、金指、佐藤、四方、松島：「常時開放型ループ配電システムの事故時負荷切換え方式」昭和61年電気四学会中国支部連合大会講演論文集、No. 050921
- (48) K. Aoki, K. Nara, M. Itoh, T. Satoh and H. Kuwabara: " A New Algorithm for Service Restoration in Distribution Systems", IEEE PES Winter Meeting, 89 WM 085-2 PWRD, 1989

- (49) K.Aoki, K.Nara, T.Satoh, M.Itoh, H.Kuwabara, M.Kitagawa and K.Yamanaka:
"Totally Automated Switching Operation in Distribution System", IEEE/PES
1989 Transmission and Distribution Conference, 89 TD 447-4 PWRD, 1989
- (50) K. Aoki, K. Nara, T. Satoh, M. Itoh and H. Kuwabara: " Optimal Restoration
Algorithm for Fault State Large Scale Distribution System", Proceedings of
International Symposium on Electricity Distribution & Energy Management,
pp.59-64, October 1988
- (51) 青木、佐々木、梶原、金指、佐藤、伊藤：「電圧降下制約を考慮した事故時負荷切
換え方式」 電気学会電力技術研究会資料PE-86-68, pp. 161-170, 昭和61年8月
- (52) 青木、梶原、金指、渡辺、錦織、佐藤、伊藤：「電圧降下制約を考慮した配電系統
の事故時負荷切り換え方法」
電気学会電力技術研究会資料PE-87-56, pp. 125-134, 昭和62年7月
- (53) 青木、奈良、梶原、佐藤、伊藤：「配電系統事故時負荷切替手順の高速解法」
電気学会電力技術研究会資料PE-88-81, pp. 51-60, 昭和63年7月
- (54) 青木、梶原、金指、佐藤、梶原、伊藤：「電圧降下を考慮した配電系統の事故時負
荷切り換え方法」 昭和62年電気学会全国大会講演論文集、No. 1165
- (55) 青木、梶原、佐藤、四方：「常時開放型ループ配電系統の事故時負荷切換え方法
(その2)」 昭和60年電気四学会中国支部連合大会講演論文集、No. 030808
- (56) 青木、梶原、金指、渡辺、佐藤、玉川：「電圧降下制約を考慮した事故時負荷切換
え方式」 昭和61年電気四学会中国支部連合大会講演論文集、No. 050922
- (57) 青木、奈良、佐藤、錦織、伊藤、渡辺(文)、村上、梶原、金指、渡辺：「配電系
統の事故時負荷切り換え方法—実系統での検証—」
昭和62年電気四学会中国支部連合大会講演論文集、No. 040918
- (58) 青木、奈良、錦織、佐藤、伊藤、四方、今村、梶原、金指、渡辺：「双対有効勾配
法による配電系統の停電復旧操作方法」
昭和62年電気四学会中国支部連合大会講演論文集、No. 040919

- (59) 青木、奈良、桑原、佐藤、渡辺、木原：「復旧の優先順位を考慮した配電系統事故時負荷切替え」 昭和63年電気四学会中国支部連合大会講演論文集、No. 040911

研究業績リスト

1. 青木、佐藤、梶原、金指：「常時開放形ループ配電システムの負荷測定の基本的な計算方法」電気学会論文誌B分冊，第107-B巻，第5号 pp.237-243，昭和62年5月
2. 青木、梶原、佐藤、金指：「スイッチ操作による変圧器およびフィーダの負荷分担均等化の計算方法」電気学会論文誌B分冊，第107-B巻，第9号 pp. 433-440，昭和62年9月
3. K. Aoki, H. Kuwabara, T. Satoh and M. Kanezashi: " Outage State Optimal Load Allocation by Automatic Sectionalizing Switches Operation in Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 4, pp.1177-1185, October 1987
4. K. Aoki, H. Kuwabara, T. Satoh and M. Kanezashi: " An Efficient Algorithm for Load Balancing of Transformers and Feeders by Switch Operation in Large Scale Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, 1865-1872, October 1988
5. K. Aoki, K. Nara, T. Satoh and H. Kuwabara: " Section Demand Data Management in Distribution Systems", Proceedings of International Symposium on Electricity Distribution & Energy Management, pp.29-34, October 1988
6. K. Aoki, K. Nara, T. Satoh, M. Itoh and H. Kuwabara: " Optimal Restoration Algorithm for Fault State Large Scale Distribution System", Proceedings of International Symposium on Electricity Distribution & Energy Management, pp.59-64, October 1988
7. 青木、梶原、奈良、佐藤：「電圧降下および容量制約を考慮した開閉器操作による配電システムの負荷測定」電気学会論文誌B分冊，第109-B巻，第2号，pp.65-72，平成元年2月
8. K. Aoki, K. Nara, M. Itoh, T. Satoh and H. Kuwabara: " A New Algorithm for Service Restoration in Distribution Systems", IEEE PES Winter Meeting, 89 WM 085-2 PWRD, 1989

9. K.Aoki, K.Nara, T.Satoh, M.Itoh, H.Kuwabara, M.Kitagawa and K.Yamanaka:
"Totally Automated Switching Operation in Distribution System", IEEE/PES
1989 Transmission and Distribution Conference, 89 TD 447-4 PWRD, 1989

付 録

付録. 1 有効勾配法

組合せ近似解法として数学的に整理された有効勾配法について概説する。本文の第5章(5.3)式～(5.12)式および第7章(7.4)式～(7.6)式などで表される最適化問題を整理すると(付1.1)式～(付1.3)式となる。

[目的関数]

$$z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \rightarrow \text{最大化} \quad (\text{付1.1})$$

[制約条件]

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (\text{付1.2})$$

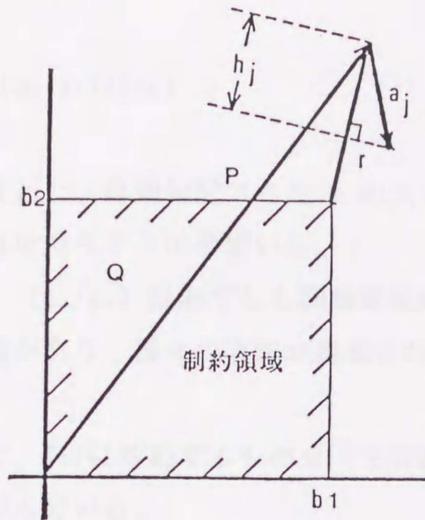
$$c_j > 0, a_{ij} \geq 0, b_i > 0, x_j \in \{0, 1\}, (i=1, 2, \dots, m), (j=1, 2, \dots, n) \quad (\text{付1.3})$$

この問題は数理計画分野で「多次元ナップサック問題」と呼ばれる問題である。もし、(付1.2)式で制約式が一本のみ($i=1$)の場合には「ナップサック問題」と呼ばれる問題になる。

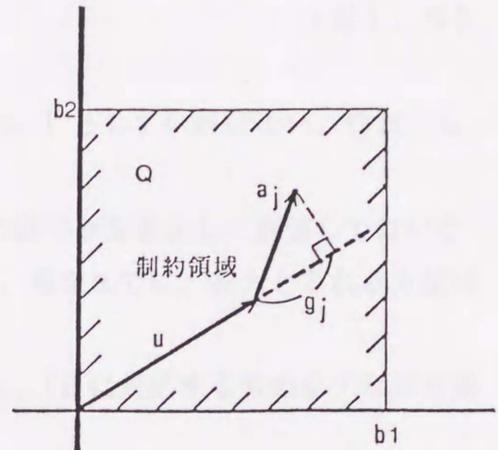
ナップサック問題は分枝限定法などで効率良く解くことができるとされているが、より簡単に近似解を求める方法として「貪欲解法」と呼ばれる方法がある。貪欲解法とは、効率の良いものは取入れ、悪いものは排除しようとする方法で、次の二通りの方法が考えられる。

- (i) $x_j=0$ ($j=1, 2, \dots, n$) に初期化し、 (c_j/a_j) の大きい順に制約条件を満足しなくなるまで $x_j=1$ とする。
- (ii) $x_j=1$ ($j=1, 2, \dots, n$) に初期化し、 (c_j/a_j) の小さい順に制約条件を満足するまで $x_j=0$ とする。制約を満足したならば、(i)の手法により $x_j=0$ としたもののうち再び $x_j=1$ とできるものを探索して、あれば $x_j=1$ としていく。

これらの方法は、ナップサック問題に対してかなり良い近似解を与えるとされている。この手法を多次元ナップサック問題に拡張した手法が有効勾配法である。いま、一次元の場合の (c_j/a_j) に対応するものとして $(c_j/|a_j|)$ を考えよう。ここで、 $|a_j|$ はベクトル $a_j = [a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{mj}]$ のユークリッドノルムである。ところが、 a_j には大きさばかりでなく方向もあるので $(c_j/|a_j|)$ では評価が不十分であり、方向も考慮する必要



付図1. 1 双対有効勾配法



付図1. 2 主対有効勾配法

がある。方向を考慮する場合には上記(i)(ii)に対応するものを分けて考えなければならないが、説明を容易にするために(ii)の方から先に扱う。

いま、 $x_j=1$ ($j=1,2,\dots,n$) とすると、制約条件を満足できないから、 m 次元上で $p = \sum_j a_j$ の先端は実行可能領域 Q の外側にある。ここで、ある j について $x_j=0$ としたときに、 p が Q への程度近づくかを評価するために、 p の先端から実行可能領域までの距離ベクトルをとる。このベクトルを $-r$ とすると(付図1. 1参照)、 r の各成分は次式で与えられる。

$$r_i = \begin{cases} p_i - b_i & : p_i - b_i > 0 \text{ のとき} \\ 0 & : p_i - b_i \leq 0 \text{ のとき} \end{cases}$$

$x_j=0$ とすると、 p の新しいベクトル p' は $p' = p - a_j$ となるが、これが、実行可能領域に近づく度合いを $-a_j$ の $-r$ への正射影 h_j で測ることにする。すなわち、

$$h_j = (-a_j)^t (-r / |r|) = (a_j^t r) / |r| \quad (\text{付1. 4})$$

ここで、 (e_j/h_j) を定義し(これを「有効勾配」と呼ぶ)、この値の小さい順に、 $x_j=0$ としていけば、(ii)の手法に対応すると考えることができる。

一方、(i)の手法に対する一つの考え方は、「現在までにどの程度制限値に近づいているかを表す」原点からのベクトル u に、「新しく $x_j=1$ としたとき制限値に近づく量」 a_j を射影する方法である(付図1. 2参照)。

すなわち、

$$g_j = (a_j \cdot u) / |u| \quad \text{（付1.5）}$$

を評価の尺度とし、有効勾配 (c_j/g_j) の大きい順に $x_j=1$ としていけばよい。なお、 u の初期値には単位ベクトルを用いる。

ところで、 (c_j/g_j) は必ずしも制約領域の境界への近づき方を正しく評価してはいないという指摘があり、種々の方法が提案されているが、現在までに、有力とされる方法はない。

上記手法で、(i)に対応するものを「主有効勾配法」、(ii)に対応するものを「双対有効勾配法」と呼んでいる。

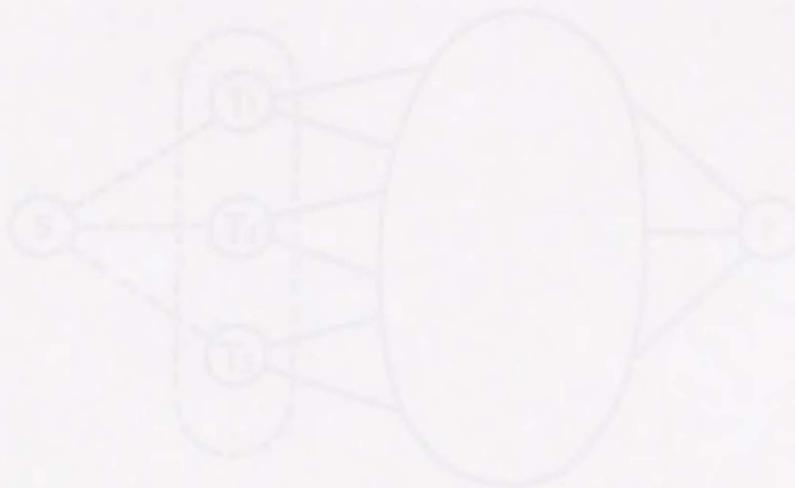


図1.1 多源ソース

【例1】

多源ソースは以下のような方法で多源ソースの形から算出する。

まず、エッジ E_j に関するフローの発生量 f_j を以下のように定義しよう。ただし、 f_j は、発生量を決定する制約内で、エッジ E_j に接続しているフロー上の各カットポイントの最小水頭差を最大にする値に選ばれるのである。例えば、付録2.3に示すシステムに於

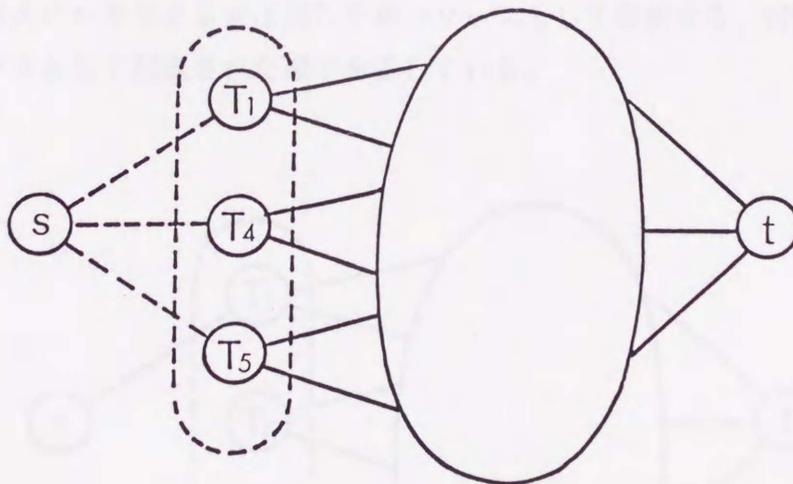
付録. 2 ソースの選択方法

負荷切替ネットワークのシンクが与えられたとき、ソースの選び方は三通り考えられる。最初は、シンクにカットスイッチを介して連結している変圧器の集合をソースとする多重ソースである。次は、多重ソースの中の一つの変圧器をソースとする単一ソースである。最後は、あらかじめ、変電所間の物理的距離、配電システムの特性、等の理由で優先順位を設けておく方法である。以下、これらの方法について説明する。

〔多重ソース〕

本文の図6. 1に示すシステムにおいて変圧器 T_3 をシンクとした場合の、変圧器 T_1, T_4 および T_5 の集合をソースとする多重ソースは、付図2. 1のように表される。ここで、変圧器 T_2 は直接に、カットスイッチを介して、変圧器 T_3 と連結していないため、多重ソースには入れない。

多重ソースを用いると一見負荷切替を速く行うことができるように思えるが、多重ソース間のカットスイッチがこのネットワークにおいてはループスイッチの役割をすることになり、多くの計算を必要とするアルゴリズムLOOPの計算量が増加する。そのため、必ずしも良い方法とはいえない。



付図2. 1 多重ソース

〔単一ソース〕

単一ソースは以下のような方法で多重ソースの中から選択する。

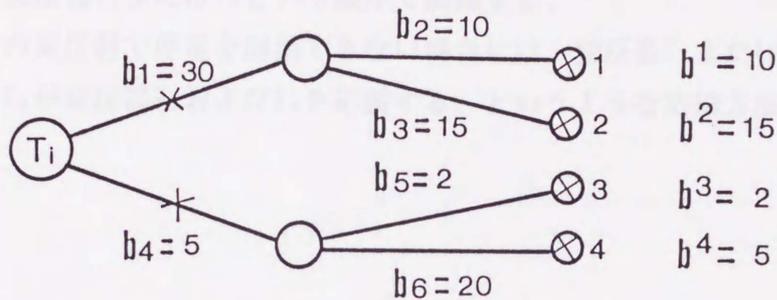
まず、変圧器 T_i に関するフィーダの総余裕容量 w_i を以下のように定義しよう。すなわち、容量制約を満足する範囲内で、変圧器 T_i に接続しているフィーダ上の各カットスイッチの最小余裕容量を多い順に加えたものである。例えば、付図2. 2に示すシステムにお

いて、変圧器 T_i に接続しているフィーダ上のカットスイッチ1, 2, 3および4に対する最小余裕容量を多い順、すなわち、 b^2 , b^1 そして b^4 という順に加えると、 $w_i=30$ となる(b^3 も選ぶと容量制約 b_i を満足しない)。

次に、変圧器 T_i の供給可能量 r_i を(付2. 1)式で定義する。

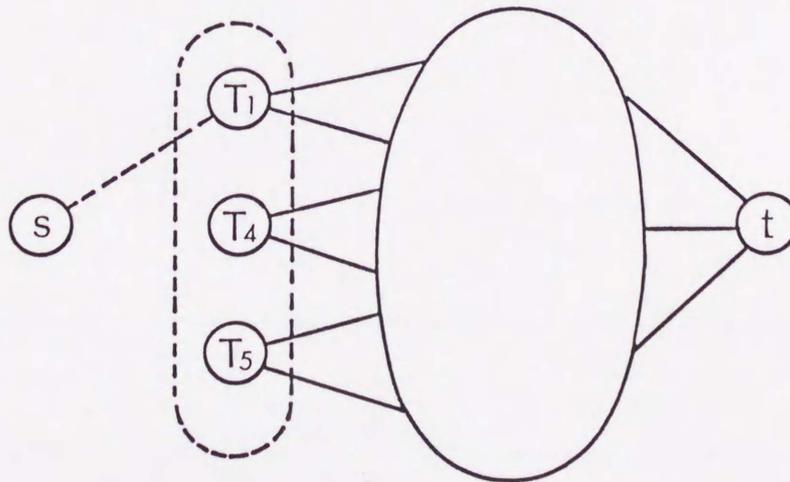
$$r_i = \min(\bar{l}_i - l_i, w_i) \quad (\text{付2. 1})$$

ここで、 \bar{l}_i および l_i はそれぞれ変圧器 T_i の容量および負荷であり、ここでの変圧器 T_i はソースであるので、 $\bar{l}_i > l_i$ とする。



付図2. 2 フィーダの余裕容量

最後に、最大の r_i を与える変圧器 T_i を単一ソースとして選択する。付図2. 3は変圧器 T_i が単一ソースとして選択された様子を表している。



付図2. 3 単一ソース

〔優先順位〕

優先順位は以下のような理由によって与えられる。

- 1) 変電所間の物理的な距離
- 2) 配電システムの特徴
- 3) スイッチ・オペレーションの柔軟性

本文の第6章で提案している負荷切替アルゴリズムにおいては、ソースおよびシンクは、これらの優先順位により、順次与えられるものとしている。例えば、本文の図6.1に示すシステムにおいて変圧器 T_3 に事故が生じた場合には、まず、同一変電所内にある変圧器 T_4 が応援する。次に、最も近くの変電所内の変圧器 T_5 がカットスイッチ7を介して応援する。そして、変圧器 T_1 または T_2 という順序で応援する。

もし、以上の変圧器で停電を解消できない場合には、変圧器 T_1 または T_2 が変圧器 T_5 を応援し、変圧器 T_5 が変圧器 T_3 および T_4 を応援する、というような応援方法を用いる。

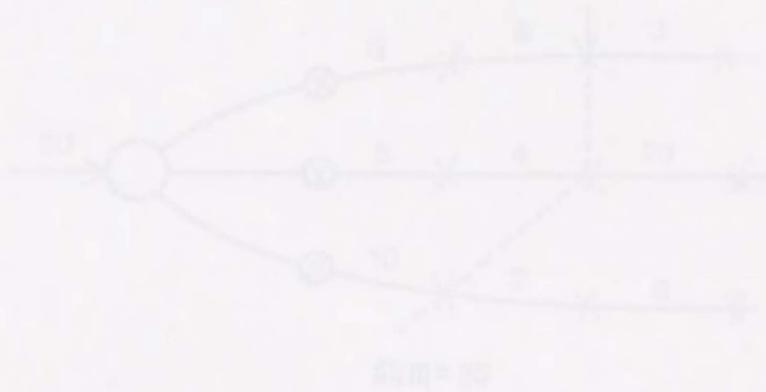


図3.1 事故発生時の状態

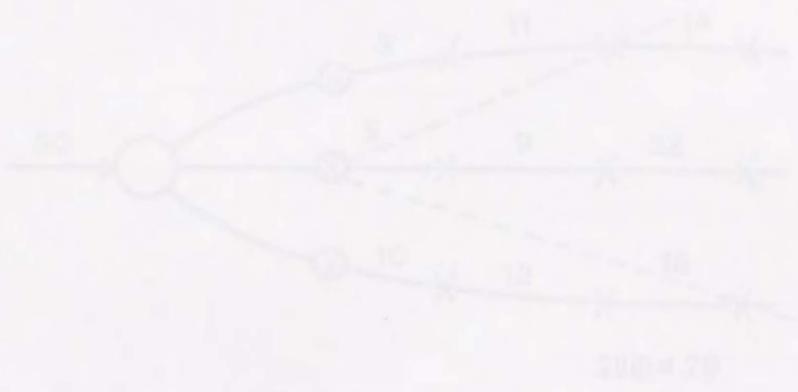
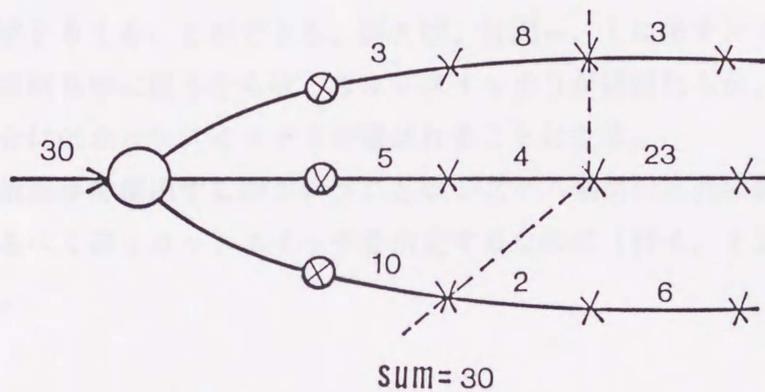


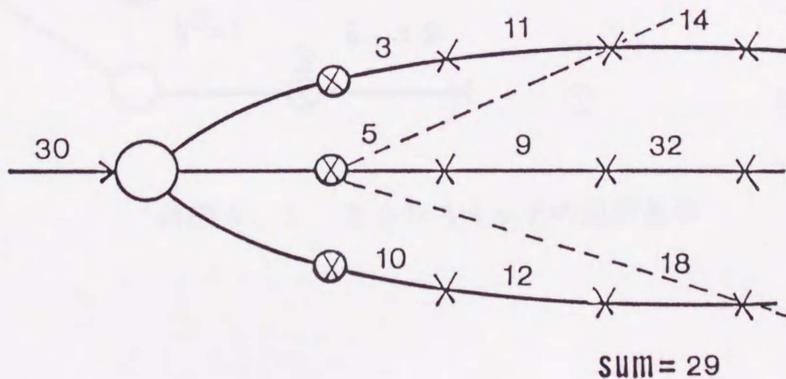
図3.2 合併した状態

付録. 3 アルゴリズムBLTAにおける別解法

アルゴリズムBLTAにおいては、付図3. 1に示すように単一の区間負荷を対象としている。これに対して、付図3. 2に示すようにカットスイッチから先の区間負荷の合計負荷を対象とすることが考えられる。このことを、付図3. 1および付図3. 2に示すシステムを用いて説明しよう。いま、両システムの供給可能量を30とする。本アルゴリズムを付図3. 1のシステムに適用すると、カットスイッチは破線で示す開放位置に変更されるので、負荷移動量は30となる。他方、付図3. 2のシステムの場合には負荷切替量は29となる。この例では前者の方法が勝っているが、一般には両方法の間に優劣を定める根拠はない。本文の第6章においては、プログラムを簡潔にするために前者の方法を用いている。



付図3. 1 本来の区間負荷



付図3. 2 合計した区間負荷

付録. 4 アルゴリズムLOOPにおける他のカットスイッチの選択基準

アルゴリズムLOOPにおいては、最も開放位置変更が容易であるカットスイッチを選択するという立場から、

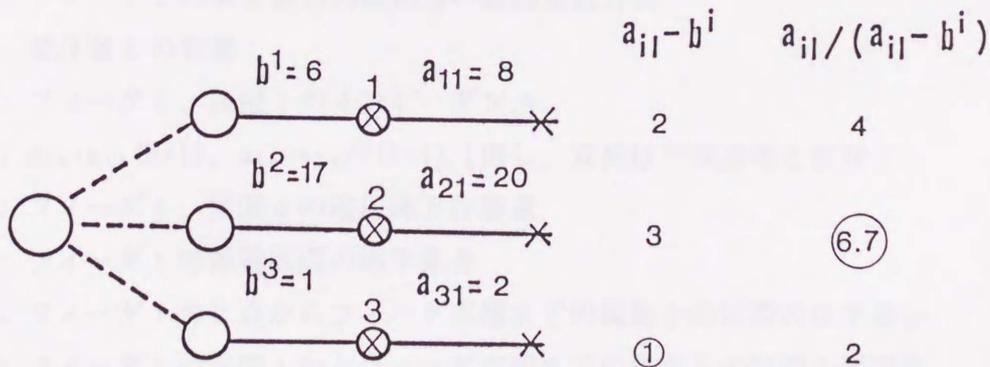
$$\min(a_{i1} - b^i) \quad (\text{付4. 1})$$

なる選択基準を設けている。しかしながら、スイッチ切替当たりの負荷移動量をできるだけ多くしようとするならば、

$$\max\{a_{i1}/(a_{i1} - b^i)\} \quad (\text{付4. 2})$$

という選択基準を考えることができる。例えば、付図4. 1に示すシステムにおいて、(付4. 1)式の選択基準に従うならば、カットスイッチ3が選ばれるが、(付4. 2)式の選択基準の場合にはカットスイッチ2が選ばれることになる。

いずれの選択基準を採用するかということはシステム運用の方針に依存する。第6章においては、なるべく速くカットスイッチを決定するために(付4. 1)に示す選択基準を採用している。



付図4. 1 カットスイッチの選択基準

付録. 5 事故時負荷切替問題の一般的な定式化

電圧降下および容量制約を考慮した事故時負荷切替問題は、数学的には以下のように定式化される。

$$\text{最小化} \quad \sum_i \sum_{j \in J_{i0}} a_{ij} x_{ij} \quad (\text{付5. 1})$$

制約条件

$$\text{(線路容量制約)} \quad \sum_{j \in J_{ik}} a_{ij} x_{ij} \leq b_{ik} \quad (\text{付5. 2})$$

$$\text{(変圧器容量制約)} \quad \sum_{j \in J_t} a_{ij} x_{ij} \leq b_t \quad (\text{付5. 3})$$

$$\text{(電圧降下制約)} \quad \sum_{l \in T_e} \{ (\sum_{q \in J_{l1}} s_{lq} x_{lq}) z_{l1} \} \leq V_{ie} \quad (\text{付5. 4})$$

x_{ij} : フィーダ i の区間 j が停電しているとき 0, 充電されているとき 1 である 0-1 変数。 x_{ij} は隣接した区間が充電されており、その区間に接続される区間スイッチが投入されているときだけ 1 にすることができる。 x_{ij} は区間スイッチの状態 (ON/OFF) の関数である。

a_{ij} : フィーダ i 、区間 j の負荷量

b_{ik} : フィーダ i の第 k 番目の監視点の線路電流容量

b_t : 変圧器 t の容量

z_{l1} : フィーダ i 、区間 l のインピーダンス

s_{ik} : $s_{ik} = a_{ik} (k \neq 1)$, $s_{ik} = a_{ik} / 2 (k = 1)$ [但し、負荷は平等分布と仮定]

V_{ie} : フィーダ i 、区間 e の電圧降下許容量

J_{i0} : フィーダ i の停電区間の添字集合

J_{ik} : フィーダ i の k 点からフィーダ末端までの線路上の区間の添字集合

J_{l1} : フィーダ i の区間 l からフィーダ末端までの線路上の区間の添字集合 (区間 l を含む)

J_t : 変圧器 t から供給を受ける全区間の添字集合

T_e : フィーダの根元から区間 e まで至る線路上の区間の添字集合