配電融通問題へのファジィ推論の適用

正員 今村 讓 (日立)
正員 叶井 実 (日立)
正員 川上 潤三 (日立)

Fuzzy Inference Application to Planning of Distribution Network Switching

Yuzuru Imamura, Member, Minoru Kanoi, Member, Junzo Kawakami, Member (Hitachi, Ltd.)

Optimal switching pattern planning is the main subject of distribution network reconfiguration to restore from blackout or to avoid blackout from maintenance and construction. This is a combinatorial optimization problem, and enumerative check of the every pattern is necessary to get the optimal solution.

Practically, successive heuristic search methods are adopted to get the quasi-optimal solution within a limited computation time. But a very long computing time is still required, when the problem size gets slightly larger. Step by step nature of the methods brings many iterations, though it assures satisfaction of the constraints. Reduction of the iterations is regarded to be necessary for the enhancement of processing speed.

In this paper, 'supply adequacy', is introduced as a new criteria index to guess the solution, which is obtained by fuzzy inference for each possible pair of source and load zone. The reconfiguration pattern is obtained at once or in a few processing steps, by assigning the each zone the source with the highest adequacy. Numerical examples show that the proposed method can get the solution faster than the ordinary method, more remarkably with the increase of problem size.

キーワード：ネットワーク，電力系統，配電系統，開閉器制御，電力融通，組合せ最適化，探索，発見的解法，ファジィ推論

1. まえがき

組合せ最適化問題である配電負荷融通のための系統接続パターン決定には、従来、発見的手法が実用的解法として採用されている⁽¹⁾。組合せの問題は、厳密に最適解を得るには逐一組合せを作って評価する必要があるが、対象が少し大規模になるとそれが事実上不可能なためである。そこで一般には、まず制約を満たす解の候補を絞り込み、次に発見的な基準により選択する、という一連の逐次処理が行われている。

こうした逐次処理は、制約を守るうえでは確実な方法だが、類似の処理を繰返すため、対象が大規模になると処理に膨大な時間が必要になる、という問題があった。本論文では、従来の逐次処理に代え、被融通部

への供給妥当性という評価指標を導入し、ファジィ推論を用いた全系一括的な融通パターン決定手法を提案する。

2. 負荷融通問題

負荷融通問題の例を図1に示す。同図で本来の供給経路である $F0$ が事故や工事などで遮られる場合を考える。この場合、#1～#9の負荷が停電になるため、平常時は開放されている連系開閉器を閉じて、周囲のフィーダ $F1 \sim F3$ から停電区間に応急的な給電復旧を図ることになる。給電復旧にあたっては、フィーダの供給可能な容量（以下、予備力と呼ぶ）の範囲内で停電負荷を残さないこと、すなわち停電量を最小にすることなどが目標になる。このための給電経路、すな

図 1 負荷融通問題の例
 Fig. 1. An example of distribution network switching pattern planning.

わち系統の接続パターンを求めるのが負荷融通問題である。

実際の融通では電圧降下の許容範囲など、種々の条件や評価基準が要求されるが、ここでは最も基本的な下記について検討する。

〔負荷融通問題の基本形〕

(1) 制約条件

(i) 各区間 #i (i=1, 2, ..., n) への供給フィーダ F_k ($k=1, 2, \dots, m$) はただか一つ (樹枝状系統保持の制約)

(ii) 各フィーダ F_k は予備力 C_k の範囲内で供給 (容量制約)

(2) 評価基準

(i) 停電量 (供給支障量) の最小化

3. 従来手法とその問題点

従来提案されている手法は、開閉器の入・切変更による連系点の移動に伴って、どの停電負荷が復旧するかを調べるもの⁽²⁾⁽³⁾と、負荷区間への供給フィーダの割付けを直接求めるもの⁽¹⁾⁽⁴⁾とに大別できるが、いずれの場合も制約条件を満たすために、逐次処理あるいは組合せを網羅することを基本としている。例えば文献(1)で述べている手法では、図2のフローに示す一連の処理を決定木に沿って逐次繰返す。この手法で、仮に、「負荷量最大の区間に、直接接続される予備力最大のフィーダで供給する」というルールを適用して図1の問題を解く過程を図3に示す。図の決定木に沿った割付けを、上から下まで一通りたどると一つの接続パターンが求まる。破線で示す分岐については、それ以降の割付けが異なる別のパターンとなる。この場

図 2 発見的探索に基づく逐次処理アルゴリズム

Fig. 2. Successive algorithm based on heuristic search.

図 3 逐次探索アルゴリズムの適用例 (図1の例の場合)

Fig. 3. A decision tree of successive search algorithm (for the case of Fig. 1).

合、ルールに従い、#4—F3、#3—F3、...と割り付けると#7が停電になるので、停電を回避するためには試行錯誤が必要になる。従って、元来の逐次処理のほかに、試行錯誤による繰返しも加わり、計算時間が膨大になるという問題があった。また、最終的に求まった解のパターンに対し、その根拠を理解するのも困難になる。

4. ファジィ推論の適用による問題点の解決

〈4・1〉 解決方針 計算時間短縮のために繰返し回数を低減することを検討する。その一つ的手段として、決定木をたどって逐次組合せを作っていくのではなく、何らかの指標を導入して最適な解を全系一括的に求められないかを検討する。これは従来の論理的な処理に対し、直感的な処理を計算機に適用しようとするものである。

具体的には、まず、区間 #i ごとに予備力をみて供給可能と考えられる供給候補フィーダ F_k をピックアップし、各々のフィーダで供給した場合について、最適な解となる可能性がどの程度かという評価指標 A_{ik} を導入する。以下、 A_{ik} を供給妥当性と呼ぶことにする。図1に示す問題における供給可能な候補を表1に

表 1 各区間に供給可能なフィーダの候補
(図 1 の例の初期状態)

Table 1. Candidate feeders with supply capability to each zone (for the initial state of Fig. 1).

F_k	F1	F2	F3
#			
#1	○	—	—
#2	○	—	○
#3	○	—	○
#4	—	—	○
#5	—	○	—
#6	○	○	○
#7	○	○	—
#8	○	—	—
#9	○	—	—

[記号]
○ : 供給可能
— : 供給不可能

図 4 処理回数低減による高速化の概念

Fig. 4. Concept of processing time reduction by reducing iterations.

示す。表 1 で○印が各負荷に供給可能な候補フィーダである。○印で示した箇所について、 A_{ik} で定量化することが今回の課題である。

図 4 に示すように、今回の提案手法では従来の逐次処理手法に比較して、初期段階ではより多くの計算時間が必要となるが、供給妥当性に従い、全系一括的に少ない繰返しの回数で解が求められるため、特に対象が大規模になると、全体としての処理時間は相対的に短くなると考えられる。

〈4・2〉 供給妥当性の算出法 各区間# i に対する候補フィーダ F_k の供給妥当性 A_{ik} を求めるために、供給能力 P_{ik} と呼ぶ指標を導入する。ここで、 P_{ik} はフィーダ F_k から区間# i にどれだけの供給が可能であるかということを示す指標である。区間ごとに最も多く電力を供給可能なフィーダを割り付ければ停電を最小にでき、また融通後の各フィーダ負荷の均等化にもつながる。ここで、 P_{ik} は一意に決まる場合と何らかの意志決定の必要な場合があるので、供給妥当性 A_{ik} の算出法を以下のように場合分けして検討する。

(1) 供給される区間に分岐のない場合 図 5 のように、供給可能な区間が一列に配置されている場

図 5 一列に配置の各区間# i へのフィーダ (F_k) ごとの供給能力 (P_{ik})

Fig. 5. Supply capability (P_{ik}) of each feeder (F_k) to the zone (# i) for the case with no branches on the root.

図 6 分岐先の各区間# i へのフィーダ (F_k) ごとの供給能力 (P_{ik})

Fig. 6. Supply capability (P_{ik}) of each feeder (F_k) to the zone (# i) for the case with branches on the root.

合、 F_k の# i への供給能力 P_{ik} は、同図のグラフに示すように、フィーダの予備力 C_k から順次手前の負荷量を差し引いていけば一意に求まる。すなわち、以下のようになる。

$$P_{i1} = C1 - \sum_{l=1}^{i-1} L_l$$

$$P_{i2} = C2 - \sum_{l=i}^{4-i} L_{5-l}$$

前述のように、フィーダ F_k から区間# i への供給妥当性 A_{ik} は、供給能力 P_{ik} の値に基づき、次式で求めることにする。

$$A_{ik} = P_{ik} / C_{\max} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$C_{\max}$: フィーダの最大予備力

従って、供給可能フィーダが最大予備力の一つだけであり、かつ、そのフィーダの連系点に直に接続される区間については、供給妥当性は 1.0 となる。

(2) 供給される区間に分岐のある場合 図 6 で、例えば、 $F1$ からは#2 を経由して分岐する#3 または#5 に供給可能であるとすると、各々の分岐に対する $F1$ からの供給能力 $P31$ と $P51$ の決定には自由度があるので、配分をどうするか意志決定が必要である。ここで、#2 に供給した後の $F1$ の供給能力を $P21'$ とすると、 $P31$ と $P51$ は下記を満たすように決

めることになる。

$$P_{31} + P_{51} = P_{21} \dots\dots\dots (2)$$

分岐においてフィードの供給能力をどう配分するかを検討するために、フィード F_k により区間 $\#i$ を経由して、少なくとも個々には供給可能な分岐の区間群 r ($r=1, 2, \dots, s$) を考える。ここで、以下のように変数を定義する。

$P_{ik'}$: $\#i$ を供給後の F_k の供給能力

$$P_{ik'} \geq \sum_{jr} L_{jr}$$

$\#_{jr}$: 分岐の区間群 r に属する区間番号

($jr=1, 2, \dots, t$)

L_{jr} : $\#_{jr}$ の負荷量

N_{jr} : $\#_{jr}$ に供給可能な候補フィード数

ここで、分岐 r に属する区間群に対し、 F_k が供給しなければならないと考えられる期待負荷量 D_r を以下のように定義する。

$$D_r = \sum_{jr} (L_{jr} / N_{jr}) \dots\dots\dots (3)$$

すなわち、期待負荷量 D_r は区間群 r の停電回避に対する F_k の寄与の割合を示す。また、(3)式の右辺で供給可能候補フィード数 N_{jr} で除している理由は、その区間に他フィードから供給される可能性がある分だけ期待負荷量が低下すると考えたためである。

次に、区間 $\#i$ より分岐するすべての区間群の期待負荷量の総和 $\sum D_r$ を用いて、分岐ごとの期待負荷量の比率

$$R_r = D_r / \sum_r D_r \dots\dots\dots (4)$$

を求めておき、 R_r をファジィ変数、 B_r を各分岐に対する供給能力 $P_{ik'}$ の配分比率として、次のファジィルールを適用する。

「 R_r が大ならば、 B_r は大である」

このルールは、停電量最小化という観点から、期待負荷量の大きな区間群に通じる分岐ほど供給能力を多く配分しようという考えに基づくものである。分岐において、その先の負荷量などの情報が全くなければ等分するしかないが、判断の基となる情報が多少でもあると、それなりのルールが適用できる。

このルールを適用して行う推論の過程を図7に示す。ある任意の R_r を大とみるか小とみるかで各々の主張は逆になるが(前者は B_r 大、後者は B_r 小)、メンバーシップ関数に応じた各主張の程度を考慮して結論を導くことができる。同図で、メンバーシップ関数のフラットな部分は、負荷のばらつきは大きくないとして、供給可能なフィード候補数の少ない区間には B_r

図7 ファジィ推論による分岐におけるフィードの供給能力の配分

Fig. 7. Calculation of distribution ratio by fuzzy inference.

図8 ファジィ推論適用の負荷融通計算アルゴリズム

Fig. 8. Fuzzy inference applied switching.

を大きくし、逆に多ければ B_r の値を 0 とするためのものである。このような割り切りは、 R_r の大きいフィードへの配分の割合を強めるもので、組合せ問題の 0-1 的側面を考慮したものである。なお、推論には簡便で処理性の良い高さ法⁽⁵⁾を用いた。

ファジィ推論で求まる B_r から、区間群 r の始点の区間 $\#r1$ へのフィード F_k の供給能力 P_{r1} は

$$P_{r1} = P_{ik'} B_r \dots\dots\dots (5)$$

として求まる。また、 $\#r1$ 以降の区間については、一列配置の場合と同様に、手前の負荷量を順次差し引いていけばよい。供給妥当性についても一列配置の場合と同様に、(5)式を(1)式に代入して求められる。

〈4・3〉 負荷融通計算アルゴリズム 図8のフローのブロック B に示すように、ファジィ推論で供給妥当性 A_{ik} を求める。 A_{ik} は、各区間 $\#i$ に対する供給可能なフィード $F_{k'}$ が対象なので、 A_{ik} の算出はブロック A で求める制約を満たすものに限定してよい。なお、このブロック A は逐次探索手法のフローであ

図 9 メンバシップ関数
Fig. 9. Membership functions.

る図2のブロック *B* と同一である。

ブロック *C* では各区分 i に対し、 A_{ik} が最大のフィード F_{k*} を供給フィードとして割り付ける選択 S_{ik}^* を行う。しかし、 A_{ik} はあくまで一つの目安なので、供給妥当性の値に際立った値のフィードのない区分については、制約違反の有無とは別にいったん供給決定を保留し、周囲が確定した後、再度同様な手順により供給可能フィードからの供給妥当性を求めて比較決定することにした。

また、ブロック *D* に示すように、供給妥当性最大のフィードを各区分に割り付ける場合、フィードの容量以上に負荷が割り付けられてないか、供給の経路は確保されているかなど、制約条件のチェックが必要である。

なお、メンバシップ関数およびパラメータは今回は図9のように設定する。最適設定については検討の余地があるが、この後の適用結果の例で示すように妥当な解が得られている。

5. 適用結果

図10と図11に本手法の適用結果を示す。図10は図1の問題に対する適用結果で、表は供給妥当性 A_{ik} の値である。 $F1$ からは#1と#9合わせて予備力30が配分される。また、 $F3$ については供給能力10が#2と#6に配分される。これらの配分決定に、前述のファジィ推論が適用される。系統図中◎で示すように、#2では A_{ik} の値に際立ったものがなく、1回目の処理では割付けが保留されているが、 A_{ik} の値の最大のものが、この場合、停電を回避できる唯一のパターンである最適解の供給フィードとほぼ一致している。

図11は少し大規模で、しかもフィードが複数の区分で連系し、ループも含む、やや複雑な場合である。前述の例と同様、フィードの予備力が少ないが停電のない、ほぼ妥当な解が求まっている。また、2回目までの繰返しで接続パターンが決定している。

従来手法との処理時間の試算比較を図12に示す。対象が大規模になるほどファジィ手法の効果が大き

図 10 試算結果 (1) —図1の系統の例—
Fig. 10. Numerical example (1) —for Network of Fig. 1—.

図 11 試算結果 (2) —25 ノード系の例—
Fig. 11. Numerical example (2) —for 25-nodes system—.

図 12 計算時間の比較
Fig. 12. Processing time comparison with the ordinary heuristic search method.

く、20 ノード程度以上になると 50%以上低減されている。また、ファジィ手法の場合、フィードごとに供給妥当性の値を複数の計算機で求めるなど、並列処理化による高速化も容易と考えられる。

6. ま と め

従来の逐次処理に代わるものとして、ファジィ推論により算出の評価指標に基づき、全系一括的に融通パターン決定を行う手法を提案した。例題に示すように比較的単純なルールによるファジィ推論でも、ほぼ妥当な評価指標が求まり、従来の手法に対し、特に大規模な問題について処理時間を大幅に低減できることがわかった。また、解の算出根拠を評価指標を用いて明確に把握できるので、更に従来手法などと組合せることにより、解の質改善に役立てることが可能と考えられる。

本論文では、供給経路として最短経路のみ想定し、原則的には迂回のないことを前提としたが、より停電の少ない解を求めるには迂回も考慮する必要がある。こうした改善を含め、今後、実フィールドにおける運用も考慮し、機能および性能の向上を図っていきたいと考えている。

(平成4年6月11日受付, 同4年11月30日再受付)

文 献

- (1) 東・畠山・今村・川上:「配電系統の負荷融通計算アルゴリズム」, 昭63電気学会大全, 1003
- (2) C. C. Liu, et al.: "An Expert System Operational Aid for Restoration and Loss Reduction of Distribution Systems", *IEEE Trans. Power Systems*, 3, No. 2, 619 (1988)
- (3) 青木, 他:「電圧降下制約を考慮した配電系統の事故時負荷切替方法」, 電学論B, 108 (昭63-7)
- (4) 山田, 他:「配電系統事故処理操作論理プログラム」, 電中研研報, No. 74071 (昭50)
- (5) 水本:「わかりやすいファジィ推論III-ファジィ推論とファジィ制御」, コンピュートロール, No. 28, 32 (平成)

今 村 譲 (正員)

昭和22年12月9日生。48年3月九州工業大学大学院修士課程修了。同年4月(株)日立製作所入社。日立研究所にて、電力系統の運用, 制御に関する研究に従事。情報処理学会会員。

叶 井 実 (正員)

昭和23年2月12日生。45年3月岩手大学工学部電気工学科卒業。同年4月(株)日立製作所入社。日立研究所にて、電磁振動, 光応用電圧・電流センサおよび配電系統機器, ならびに絶縁劣化監視, 制御システム開発など, 配電系統全般に関する研究に従事。

川 上 潤 三 (正員)

昭和19年7月29日生。48年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年同大学工学部電気工学科講師, 50年同助教授。56~57年ヒューストン大学エネルギー研究所研究員。57年(株)日立製作所入社。電力系統の解析, 制御およびAI応用の研究などに従事。工学博士。50年電気学会論文賞受賞。計測自動制御学会, IEEE, AAAI 会員。