遺伝アルゴリズムを応用した想定事故選択問題の解法

正員 斎藤 浩海 (東北大)

正員 高野 豊 (北陸電力)

正員 豊田 淳一 (東北大)

Genetic Algorithm Based Method for Contingency Screening in Power Systems

Hiroumi Saitoh, Member, Yutaka Takano, Member, Junichi Toyoda, Member (Tohoku University)

This paper proposes an application of Genetic Algorithm (GA) to contingency screening in power systems. The contingency selected by the GA based screening method is the double line outage which has the risk of causing transient instability. Generally, the contingency screening problem including multiple outage can be interpreted as the combinatorial optimization one for searching the combination of single outages which makes the system insecure. Therefore, GA which is one of the probabilistic search for combinatorial problems, is applicable for such contingency screening problem. In the GA based contingency screening method, a double line outage is represented as a chromosome. The fitness of chromosome for environment is defined by using transient energy function of power systems. The new procedure for avoiding the loss of important outage during contingency screening is developed and embedded in the proposed method by using the theorem of schema for GA. The validity of the proposed method is confirmed by applying to 6-machine 30-bus 40-line system. The result shows that the GA based contingency screening has the potential for practical use.

キーワード：想定事故選択，遺伝アルゴリズム，過渡安定度，エネルギー関数，スキーマ定理

1. ま え が き

想定事故解析は電力システムのセキュリティを評価するための重要な手段である。この解析の考え方は、現在あるいは数十分先の系統状況においてある事故を仮定し、線路過負荷や発電機の過渡的不安定性などが生じるか否かを判定するものである。通過、電力系統は計画段階において($N-1$)セキュリティ規準を満たすように設計されているので、単一事故によるセキュリティの悪化の危険性は少ないといえる⁽¹⁾。しかし、厳しい運用状況では単一事故が多重事故を引き起こし、系統に大きな影響をもたらす可能性がある。従って、想定事故解析では、考えられる多数の事故ケースから重大な多重事故をどのように効率的に選択するかが重要となる。

本論文は、遺伝アルゴリズム(以下、Genetic Algorithm; GA と略記)の重大多重事故選択問題に対する適用可能性を模索するため、その基礎的検討を行ったものである。特に、過渡安定度を悪化させる二重線路事故の選択問題にGAを適用する方法を提案している。

一般に、多重事故を含めた想定事故選択問題は、どのような単一事故の組合せがセキュリティの悪化をもたらすかという組合せ最適化問題となる。この問題を解く最も単

純な方法は、単一事故を組み合わせたすべての多重事故について解析を行い、重大事故の候補となる組合せを探し出すことである。しかし、大規模電力系統ではこの総当たり法の組合せ数が膨大となり、有限の時間内に重大事故選択を行うことが困難と予想される。更に、重大事故選択の規準を過渡安定度とした場合、重大事故を精確に発見しようとすれば、単一事故の組合せごとに動特性シミュレーションを行う必要性が生じ、限られた時間内での選択が更難しくなろう。実用的な視点から簡便に重大事故を選択するためには、次の条件が必要である。

(i) 緊急度の高い重大事故を効率良く発見する。

(ii) 緊急度の高い重大事故をとりこぼさない。

条件(i)を満たすためには、事故選択の評価指標を簡略にし、また選択手法を工夫して計算時間を短縮する必要がある。しかし、評価指標を簡略化しすぎたり、選択を荒くしすぎると評価をし損なって、選択すべき重大事故を取りこぼす可能性がある。このように、条件(i)、(ii)は相矛盾する要求であり、これらのバランスをとった手法の開発が望まれることになる。

一方、GAは、ある環境下で染色体の群が生殖、交差、突然変異の操作を受け、世代を重ねるごとにその環境に適合した染色のみが生き残ることを模倣した確率的解探索手

法である。近年、電力系統の分野においても、幾つかの応用研究が始められている^{(2)~(5)}が、想定事故選択問題に応用しようという研究は見当たらない。

GAの主要な特徴は次の点にある。

- (1) 適用する問題の変数を染色体にコード化する。
- (2) 解空間を多点探索する。
- (3) 問題の目的関数に連続性を要求しない。

これらの特徴のうち、多点探索は、複数の重大事故を同時に発見できうという点で、重大事故選択手法の条件(i)に望ましい性質である。また、目的関数に関する特徴も、事故選択の評価指標が種々の事故に関して連続的に変化するとは限らないという離散的性質と合致している。更に、過渡安定度を対象とした重大事故選択の場合、事故選択の指標として、エネルギー関数を利用できる可能性がある。このようにGAの特徴は重大事故選択に望まれる条件と整合性があり、両者の相性の良さが「GAは重大事故選択問題の解法として利用できるのではないか」という本研究の動機となっている。

ところで、GAの適用に際しては、問題に適した染色体構造の設定が重要となる。提案手法では、各染色体の意味がわかりやすく、適用系統の規模に依存しない染色体構造を用いている。また、GAには、有限回の反復操作で大域的最適解を得られる保証がない。これはGAを用いて重大事故選択を行ったとき、選択すべき事故を取りこぼす危険性のあることを示している。提案する手法では、この問題点を解決する一つの方法としてスキーマの定理を応用し、解探索領域を絞り込みながら準最適解あるいは大域的最適解を多段階で求め、重大事故の取りこぼしを低減する工夫をしている。

提案手法を6機30母線40送電ルートのモデル系統に適用した結果、過渡安定度上重大となりうる二重線路事故をうまく発見できることが確認されている。

2. 過渡安定度からみた重大線路事故選択手法

〈2・1〉 問題の設定 過渡安定度に主眼をおいた重大線路事故選択問題は、「どのような多重線路事故が系統の過渡安定度余裕を低下させ、発電機を脱調させる危険性があるか」と記述できる。本章では、この問題にGAを適用する方法を提案する。なお、提案手法では、過渡安定度に大きなインパクトを与え、かつ大規模系統では事故ケース数が膨大となる送電線路の二重同時事故のみを対象としている。また、想定事故として2線路の三相地絡事故が同時に発生し、かつ事故除去時間後に同時に除去されて、再閉路はしないものとしている。

まず、問題の枠組と基本的なアプローチの仕方を図1の一機無限大母線系統を用いて説明する。この系統には3ルートの送電線があり、それぞれのルートは等しいリアクタンスをもつ2回線の線路で構成されているものとする。すなわち、事故発生前には6線路で送電されている。いま、どのような組合せの名重事故でも、事故継続時間が等し

系統パラメータ (pu)

- ・送電ルート#1, #2, #3の各線路リアクタンス:
 $x_1=0.4, x_2=0.8, x_3=1.6$
- ・その他: $x_T=0.1, x_d'=0.01, E'=1.1, P_m=1.0$

図1 提案手法の説明用系統モデル

Fig. 1. Power system model for explanation of the proposed method.

く、かつ事故中には発電機母線が三相地絡しているものと考え、事故中に発電機慣性に蓄えられる加速エネルギーは事故ケースによらず一定となる。従って、異なる事故の過渡安定度に及ぼす影響の違いは、事故除去後の送電線構成によって決まることになる。図1の系統の場合、過渡安定度に異なる影響を与える事故の総数は、異なる送電ルートの多重事故3通りと同一送電ルートの多重事故3通りの計6通りとなり、この中から過渡安定度を最も悪化させる事故を選択すればよいことになる。

一般に過渡安定度を評価するための最も基本的なアプローチには、事故発生後の系統動特性シミュレーションにより分析する方法とエネルギー関数で評価する方法がある。動特性シミュレーションは計算時間のかかる手段であるので、効率性が要求される重大線路事故選択手法には不向きである。そこで、提案手法ではエネルギー関数法を利用している。図1の系統のエネルギー関数、特にそのポテンシャルエネルギーは、発電機の過渡リアクタンス背後電圧一定モデルで表現したとき、次の動揺方程式から求めることができる。

$$M\ddot{\delta}' = P_m - \frac{E'V_0}{x_{eq}} \sin(\delta') \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、無限大母線の電圧 V_0 を $1 \angle 0$ と仮定している。また、 E', δ' は背後電圧母線の電圧と位相角、 M は発電機慣性、 P_m は原動機入力、 x_{eq} は背後電圧母線から無限大母線までの過渡リアクタンス x_d' と変圧器リアクタンス x_T および送電線リアクタンスの直列等価リアクタンスを表している。

(1)式をエネルギー積分し、ポテンシャルエネルギーの項を求めると次式を得る。

$$V_p(\delta'; x_{eq}) = -P_m(\delta' - \delta_0') - \frac{E'V_0}{x_{eq}} (\cos \delta' - \cos \delta_0') \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 δ_0' : 運転平衡点での位相角

さて、前述したように事故中の発電機慣性に蓄えられる加速エネルギーが事故によらず一定ならば、図1の一機無限大母線系統において各事故の過渡安定度に及ぼす影響の度合は、事故除去後の送電線構成、すなわち事故回線開放

図 2 事故前と事故除去後のポテンシャルエネルギーの構造

Fig. 2. Pre-fault or post-fault structure of potential energy.

後の等価リアクタンス x_{eq} に依存することになる。いま、事故発生前の等価リアクタンスと運転点の位相角を x_{eqN} , δ'_{0N} , 送電ルート i と j のそれぞれ 1 回線事故除去後のそれらを x_{eqij} , δ'_{0ij} とすれば、事故前と事故後の系統のポテンシャルエネルギーの形状は図 2 の細線と太線ようになる。ここで、もし事故中に蓄えられた加速エネルギーが事故除去後の不安定平衡点 ($\pi - \delta'_{0ij}$) におけるポテンシャルエネルギーのレベルより大きければ、発電機は過渡的に不安定となり、第一波脱調することになる。一方、想定した事故の条件から加速エネルギーは事故によらず一定であるので、どの事故が過渡安定度余裕を最も減少させるかは、事故除去後系統の不安定平衡点 ($\pi - \delta'_{0ij}$) におけるポテンシャルエネルギーのレベルで評価できることになる。そこで本論文では、各事故の過渡安定に及ぼす影響度を、次式で定義される事故前と事故除去後のそれぞれの不安定平衡点におけるポテンシャルエネルギーの差で評価している。

$$\begin{aligned} \Delta V_{ij} &= V_p(\pi - \delta'_{0N}; x_{eqN}) - V_p(\pi - \delta'_{0ij}; x_{eqij}) \\ &= 2P_m(\delta'_{0N} - \delta'_{0ij}) + 2E' V_0 \left(\frac{\cos \delta'_{0N}}{x_{eqN}} - \frac{\cos \delta'_{0ij}}{x_{eqij}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ΔV_{ij} は図 2 におけるポテンシャルの山の落差を表しており、過渡安定度の余裕を減少させる事故ほど、正の大きな値をとる。従って、当初の重大線路事故選択問題は「 ΔV_{ij} を最大とする多重線路事故はどれか」と言い換えることができる。ここで事故除去後の不安定平衡点におけるポテンシャルエネルギーを直接用いないで、 ΔV_{ij} を重大線路事故選択指標としている理由は、GA が一般に最大値探索手法であることによる。なお、一般にエネルギー関数には負荷などによる事故エネルギーの消散の効果を含める必要があり、また多機系統では不安定平衡点が複数存在するので、系統が不安定になるとき、どの不安定平衡点を通過するのかを事故中、および事故除去後の系統状態の軌跡を利用して判定する必要がある⁽⁷⁾。しかし、本論文では、GA を想定事故選択問題の相性の良さに焦点を当てているので、そ

表 1 各線路事故に対応する想定事故選択指標 ΔV_{ij}
Table 1. Index for contingency screening ΔV_{ij} corresponding to each line outage.

線路事故	x_{eqij}	δ'_{0ij} (deg)	ΔV_{ij}
単 一 事 故			
# 1	0.270	14.21	1.64
# 2	0.243	12.78	0.75
# 3	0.233	12.23	0.37
二 重 線 路 事 故			
(# 1, # 1)	0.377	20.02	3.85
(# 1, # 2)	0.310	16.37	2.65
(# 1, # 3)	0.288	15.17	2.13
(# 2, # 2)	0.270	14.21	1.64
(# 2, # 3)	0.255	13.43	1.17
(# 3, # 3)	0.243	12.78	0.75
事故前	0.224	11.76	0.0

の軌跡の効果を含めない控えめに過渡安定度を評価する ΔV_{ij} を用いている。更に、多機系統では、 ΔV_{ij} を (3) 式のような単純な式で表現することが難しいので、付録で述べる簡略式を用いている。

表 1 は、図 1 に示した系統パラメータを用いて各事故に対応する ΔV_{ij} を求めた結果である。 ΔV_{ij} が最大値となるのは、送電ルート #1 の 2 の回線同時事故であり、最も送電能力の高い線路の欠落が、最も過酷な事故であることを意味している。この例のように、二重線路事故のケースが 6 通りと少ない場合には、すべてのケースを総当たりで分析すればよい。しかし、実規模系統、例えば 2 回線構成の送電線が 1,000 の系統では、二重線路事故の組合せだけで 500,000 通りあり、単純な総当たりで効率的に想定事故を選択することは不可能に近い。従って、次節で述べるように、GA を用いた提案手法の可能性を検討する意義は高いと考えられる。

〈2・2〉 GA による重大線路事故選択手法の提案 GA は最大値探索問題の一解法であり、次の特徴を有している⁽⁶⁾。

(1) 問題の変数を染色体とみる。

(2) 目的関数を染色体の環境に対する適合度とみる。前節で述べた重大線路事故選択問題では、線路事故の組合せが問題の変数、事故選択指標 ΔV_{ij} が目的関数に相当する。従ってこの問題を GA で解くためには、事故の組合せを染色体表現し、 ΔV_{ij} を適合度とみなせばよいことになる。図 3 は本論文で提案する手法のアルゴリズムの流れである。

まず、線路事故の組合せの染色体表現を次のように行っている。各送電ルートに付した番号 i を 2 進数 b_i に変換・コード化し、送電ルート i と j の 2 回線同時事故を次式の染色体 C_{ij} で表現する。

$$C_{ij} = (b_i \text{ と } b_j \text{ を並べた 2 進数}) \quad (4)$$

例えば、図 1 の系統で送電ルート #1 の 1 回線と #3 の 1 回線の同時事故は、 $b_1 = 01$, $b_3 = 11$ なので、 $C_{13} = (0111)$ と表現される。なお、 C_{ij} と C_{ji} は同一の事故とみなして処理する。また、 $C_{00} = (0000)$ は事故発生前の状況、 C_{0i} ま

図3 提案する多重線路事故選択手法のアルゴリズム

Fig.3. Proposed algorithm of GA based contingency screening.

たは C_{i0} は送電ルート # i の 1 回線単一事故を表すものとする。線路事故の染色体表現にはいろいろあり、例えば事故線路を 0、健全線路を 1 に対応させ、線路の総数と等しいビット数の染色体とすることも可能である。しかし、この表現法では系統規模によって染色体の長さを変更する必要があり、GA を適用するうえで繁雑となる。また染色体が長いと解探索の時間も長くなるので、重大線路事故選択手法には好ましくない。その他の表現法についても検討したが、結局、系統規模に依存しない (4) 式の表現を採用している。

以下に、図 1 の系統を例として提案アルゴリズムを説明したい。

[A]: m 組の多重線路事故に対応する第 1 世代の染色体 (単一事故や事故前の状況を表す染色体も含む) を m 個ランダムに発生させる。例えば、 $m=3$ として染色体 $C_{13}=(0111)$ 、 $C_{23}=(1011)$ 、 $C_{30}=(1100)$ が確率的に選ばれたとする。

[B]: m 組の多重線路事故に対応する事故選択指標 ΔV_{ij} を求める。すなわち、染色体 C_{13} 、 C_{23} 、 C_{30} の環境に対する適合度を (3) 式から $\Delta V_{13}=2.13$ 、 $\Delta V_{23}=1.17$ 、 $\Delta V_{30}=0.37$ を求める。

[C]: 上記のプロセスから求めた染色体群と対応する適合度を用いて、GA における以下の三つの遺伝操作をその

染色体群に施す。

(i) 生殖操作 各染色体 C_{ij} が再生される確率 $p(C_{ij})$ を次式により求める。

$$p(C_{ij}) = \frac{\Delta V_{ij}}{(\text{各染色体に対応する適合度の総和})} \quad \dots\dots\dots (5)$$

すなわち、 $p(C_{13})=0.58$ 、 $p(C_{23})=0.32$ 、 $p(C_{30})=0.10$ と求める。続いて、確率 $p(C_{ij})$ の大きさに分割されたルーレットを考え、 m 回そのルーレットを回して、再生される各染色体 C_{ij} の個数を決定する。染色体 C_{13} 、 C_{23} 、 C_{30} の再生される個数の期待値は、それぞれ約 2、1、0 個となる。

(ii) 交差操作 この操作を各世代で実行するか否かは確率的に決定する。この確率を交差率 P_c と呼ぶ。この操作を実行する場合には、まず再生後の m 個の染色体からランダムに 2 個の染色体を選ぶ。続いて、それらの同じ位置を切断して、切断部分を相互に交換することにより、新しい二つの染色体を生成する。なお、切断位置も確率的に決定する。例えば生殖操作により C_{13} 、 C_{13} 、 C_{23} の三つの染色体が再生され、そのうち C_{13} と C_{23} が選ばれたとしよう。また、切断位置が第 4 ビットと第 3 ビットの間であったとすれば、交差によって新たに生成される染色体は $C_{33}=(1111)$ と $C_{03}=(0011)$ となる。

(iii) 突然変異操作 各世代で実行するか否かを突然変異率 P_m を指定して、確率的に決定する。突然変異操作は次のように行う。まず、交差操作後の m 個の染色体から一つの染色体をランダムに選び、その遺伝子の一つを変化させる。ただし、変化させる遺伝子の位置を確率的に決める。例えば、交差操作後の染色体 C_{03} 、 C_{13} 、 C_{33} のうち C_{13} が選ばれ、その第 2 ビットが 1 から 0 に反転されたとすれば、新たに $C_{11}=(0101)$ という染色体が生成されることになる。

[D]: 上記[B]、[C]のプロセスを繰り返す、事前に設定した繰返し最大数 (最大世代数) に達したとき、重大線路事故選択のプロセスを終了する。提案手法では、最後の 3 世代に生き残った染色体群、計 $3m$ 個から適合度の最も高い染色体に対応する事故を重大線路事故の候補として選択する。

上記の手順によって重大線路事故を選択するが、GA 操作の繰返し数を有限回に設定しているため、[D]までのプロセスで得られる事故には過渡安定度を最も悪化させる事故が含まれていない可能性がある。そこで、この問題点を解消するため、提案手法では解探索空間の絞り込みを行い、一度目の GA 探索で漏れてしまった重要な事故を再度発見する工夫をしている。図 3 の破線で示したパスがこの絞り込みのプロセスを示しており、その詳細を第 4 章で述べる。

3. 中規模系統モデルへの提案手法の適用

提案手法を図 4 に示す 6 機 30 母線 40 送電ルートの系統

図 4 6機30母線40送電ルートの系統モデル
Fig. 4. 6-machine 30-bus 40-line system model.

表 2 98~100 世代に生き残った染色体と対応する二重線路事故 ($P_c=0.5$, $P_m=0.03$)

Table 2. Chromosomes surviving during 98-100 generation and corresponding double line outages ($P_c=0.5$, $P_m=0.03$).

染色体	個体数 (総数 30)	ΔV_{ij}	二重線路事故
(100110100110)	23	25.7	(#38, #38)
(100110100111) または (100111100110)	5	11.5	(#38, #39)

モデルに適用し、その妥当性を検証した。なお、各送電ルートは等しいリアクタンス値をもつ無損失線路の2回線で構成されており、また事故発生前と除去後において発電機出力と負荷は変化しないものと仮定している。想定する二重線路事故を表す染色体は、各送電ルートに付した番号を6ビットの2進数に変換し、これを二つなぎ合わせた計12ビットの2進数としている。例えば、ルート#21の1回線と#35の1回線の二重事故を(0101011100011)と表現する。なお、送電ルート番号が41以上の実在しない事故に相当する染色体や単一線路事故を表す染色体がGA操作中に生じた場合、その対応する適合度 ΔV_{ij} を0と置いている。ここで、適合度 ΔV_{ij} は付録(付2)式の多機系統における事故選択指標を用いている。また、GA操作の各世代で生成する染色体の個数を10個、すなわち1回のGA操作で10ケースの線路事故を評価するようにしている。

表2は、GA操作の最大繰返し数を100回、交差率 $P_c=0.5$ 、突然変異率 $P_m=0.03$ としたときの、後半3世代

図 5 各世代における適合度 ΔV_{ij} の平均値と最大値の推移

Fig. 5. Average and maximum value of fitness ΔV_{ij} at each generation.

に生き残った二重線路事故に対応する染色体を示している。ただし、生き残った染色体のうち実在しない事故や単一線路事故に相当する二つの染色体を表から省いている。図5は、100世代までの各世代における適合度 ΔV_{ij} の平均値と最大値の推移である。35世代付近以降の最大値が約25と一定となり、また100世代付近で平均値が最大値にほぼ近づいていることから、100世代付近の各世代で生成された10個の染色体群は、適合度の高いほぼ同種の染色体から構成されていることがわかる。従って、表2の個体数23、適合度 $\Delta V_{ij}=25.7$ の染色体に対応する送電ルート#38の二重線路事故(#38, #38)が選択すべき重大二重線路事故の候補となる。なお、GA操作の最大繰返し数を100より大きく設定した場合や交差率、突然変異率を変更した場合にも、事故(#38, #38)が重大事故の候補として選択されている。この提案手法の結果は、送電ルート#38が電源地帯と需要地帯を結ぶ主要な輸送経路であり、このルートの送電が不能になれば系統の過渡安定度を大きく低下させる危険性のあることと合致している。また、もう一つの染色体に対応する二重線路事故(#38, #39)も、需要地帯に輸送する主要ルートの事故に相当しており、提案手法が過渡安定度の低下をまねく危険性のある事故をうまく選択してきているといえる。

ところで、GAは有限回の解探索で最適解が得られるという保証がないので、上述した事故(#38, #38)が適合度 ΔV_{ij} を最大にするとは限らない。そこで、図6に示すようにすべての二重線路事故820ケースについて ΔV_{ij} を求め、事故(#38, #38)が ΔV_{ij} を最大にするか否かを確認した。図6は、 x, y 軸方向に送電ルート番号を若い順に並べ、各2重線路事故に対応する ΔV_{ij} を z 軸方向にとったグラフである。なお、二重線路事故($\#i, \#j$)と($\#j, \#i$)は同一の事故を表すので、図中には一方の事故に対する ΔV_{ij} のみをプロットしている。

さて、図6から明らかなように二重線路事故(#38, #38)は、2番目に大きな ΔV_{ij} を与える準最適解に相当している。 ΔV_{ij} が最大となる二重線路事故は送電ルート#10の2回線同時事故(#10, #10)であり、この事故は上述した提案手法で選択できなかったことになる。そこで、

図 6 各二重線路事故に対応する適合度 ΔV_{ij}
Fig. 6. Fitness ΔV_{ij} corresponding to each double line outage.

この問題を解消するため、送電ルート #10 の番号を #37 と付け替え、事故 (#10, #10) を事故 (#38, #38) の近くに位置するように解探索空間の構造を変更して、重大線路事故の探索を試みた。しかし、結果は表 2 と同じであり、事故 (#10, #10) を選択できなかった。提案手法では、この問題を解決するため、次章で述べるスキーマ定理を応用した多段階の解探索を行い、重大事故の取りこぼしを低減するようにしている。

4. スキーマ定理に基づく解探索空間の絞り込み

第 3 章で示したように、GA で解空間全体を一度だけ探索しただけでは、最大の適合度 ΔV_{ij} を与える重大二重線路事故を発見できない可能性がある。本章では、その理由と改善方法を GA の基礎をなすスキーマ定理に基づいて述べ、解探索空間を絞り込みながら重大線路事故を発見する手法について述べる。

〈4・1〉 スキーマ定理の意味 ここでは、第 2 章の一機無限大母線系統において線路事故の染色体表現に用いた 4 ビットの 2 進数を例に説明する。まず、スキーマとは、ある特定の位置の遺伝子のみを指定した染色体の集合である。(4) 式の染色体表現において、(*1*1) は第 1 ビットと第 3 ビットの遺伝子を 1 と指定したスキーマである。ここで、記号 * は Don't care と呼ばれ、この位置の遺伝子が 1 または 0 のいずれの値をとってもよいことを示している。このスキーマは、具体的には次の染色体の集合を表現している。

$$(*1*1) = \{(0101), (0111), (1101), (1111)\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

スキーマ定理は、このような染色体の集合が世代を重ねるごとに生き残るのか死滅するのかの目安を与え、その目安は次式によって表される。

$$M(S, t+1) = \alpha(S) M(S, t) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\alpha(S) = \frac{f(S)}{f_{av}} \left(1 - P_c \frac{\delta(S)}{L-1} - O(S) P_m \right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $M(S, t)$: スキーマ S に属する t 世代目の染色体の個体数の期待値、 $f(S)$: スキーマ S

に属する染色体の適合度の平均値、 f_{av} : すべての染色体の適合度に関する平均値、 $\delta(S)$: スキーマ S の構成長、 L : 染色体の長さ (総ビット数に相当)、 $O(S) [= L - (\text{Don't care}^* \text{の個数})]$:

スキーマ S の次数

スキーマ S の構成長 $\delta(S)$ は、 S の最も左の 0 または 1 と最も右の 0 または 1 の間の距離を表し、スキーマ (*1*1) の場合、 $\delta(S)=2$ となる。また次数の $O(S)$ は、 $L=4$ 、* の個数 2 であるので $O(S)=2$ となる。(7) 式の意味するところは、 $\delta(S)$ および $O(S)$ が小さく、かつ全体の適合度の平均 f_{av} より大きな適合度 $f(S)$ を有するスキーマが次世代に生き残りやすいということである。すなわち、 $\alpha(S)$ の大きなスキーマに属する染色体ほど生き残る確率が高い。例えば、スキーマ (*1*1) と (*0*0) のどちらが生き残りやすいかを比較してみよう。 $P_c=0.5$ 、 $P_m=0.03$ としてそれぞれの $\alpha(S)$ 値を表 1 の ΔV_{ij} を用いて求めてみると、前者が 0.91、後者が 0.32 となり、適合度 ΔV_{ij} を最大とする二重線路事故 (#1, #1) を含むスキーマ (*1*1) が生き残りやすいことがわかる。

〈4・2〉 スキーマ定理の応用 第 3 章における 6 機 30 母線系統の重大線路事故選択で問題となった事故 (#10, #10) が一度の GA 探索で求まらない理由は、スキーマ定理から次のように説明できる。まず、事故 (#38, #38) と (#10, #10) の各々を含むスキーマ (100110****) と (001010****) の $\alpha(S)$ 値を求めると、それぞれ 5.41, 0.97 となる。この結果から、事故 (#38, #38) が選択されやすく、事故 (#10, #10) のような適合度の低いスキーマに属する大域的最適解は、解空間全体の一度の探索だけでは発見しにくいことがわかる。

さて、スキーマ定理からわかるように、最終的に生き残った染色体群は適合度の高いスキーマに属している。また、GA は確率的多点探索法であるので、生き残った染色体群には、ある程度遺伝子構成の異なったものも含まれている。これらの性質は、生き残った染色体群から解空間の構造を推定し、全体として適合度のあまり高くない空間のみを再度探索すれば、事故 (#10, #10) のような解を発見できる可能性のあることを示している。この解空間の絞り込みは図 3 の点線のパスに対応し、その手順は以下のとおりである。

〔E〕: 染色体群の特徴抽出 生き残った染色体群を共通に含むスキーマ S を同定する。ただし、その染色体群に遺伝子構成の異なったものがあまり含まれていない多様性の乏しい場合には、次のように染色体群の特徴抽出を行う。まず、各染色体を同じ長さに 2 分割し、半分の長さの遺伝子構成を一つの染色体とみなす。続いて、その染色体群を共通に含むスキーマ S_H を同定し、これを用いて本来の染色体の長さをもつ次の二つのスキーマを生成する。

$$S_R = (\underbrace{S_H}_{\text{長さ } L/2} \underbrace{****}_{L/2}), S_L = (**** S_H) \quad \dots\dots\dots (9)$$

例えば、表 2 に示した事故 (#38, #38) と (#38, #39)

表 3 解探索空間の絞り込みを行った場合の重大線路事故の候補 ($P_c=0.5$, $P_m=0.02$)

Table 3. Candidates of serious line outage obtained by searching the solution space which is limited by using schema theorem ($P_c=0.5$, $P_m=0.02$).

絞り込みの有無	染色体	固体数 (総数 30)	ΔV_{ij}	二重線路事故
絞り込みなし 1~50 世代	(100110100110)	23	25.7	(# 38, # 38)
	(100110100111)			
	または (100111100110)	5	11.5	(# 38, # 39)
絞り込みあり 51~100 世代	(001010001010)	21	42.9	(# 10, # 10)
	または (000111000111)	9	10.9	(# 7, # 7)

図 7 各世代における適合度 ΔV_{ij} の最大値の推移

Fig.7. Maximum value of fitness ΔV_{ij} at each generation.

(a) 事故 (# 38, # 38): 提案手法により選択された重大線路事故の候補

(c) 事故 (# 1, # 1): 提案手法からは選択されなかったが、動揺が大きい二重線路事故の例

(b) 事故 (# 8, # 9): 提案手法により選択されず、かつ動揺が小さい二重線路事故の例

図 8 二重線路事故による各発電機の周波数変動
Fig.8. Frequency fluctuation of each generator caused by double line outages.

に対応する染色体は (100110100110), (100110100111), (100111100110) の3種類であるので, これを共通に含むスキーマ S は $S = (10011 * 10011 *)$ となる。ただし, この場合, 生き残った染色体群に多様性が乏しいので, スキーマ S_R と S_L を求め, それを染色体群の特徴とする。2分割した遺伝子構成には, (100110) と (100111) の2種類があるので, $S_H = (10011 *)$, $S_R = (10011 * * * * * *)$, $S_L = (* * * * * * 10011 *)$ となる。この S_R と S_L は二重線路事故 (#38, #i) と (#i, #38) ($i=1, 2, \dots, 40$) に対応する解空間を含んでいる。

[F]: 適合度の変更による探索空間の絞り込み スキーマ S またはスキーマ S_R, S_L は適合度の高い解空間を含んでいる可能性が高いので, 再度, GA で探索を試みる空間は S または S_R, S_L を除く空間となる。ここでの処理は, S または S_R, S_L に属する染色体の適合度 ΔV_{ij} をGAの生殖操作において常に0となるように設定する。

以上の解探索空間の絞り込みを複数回行うことにより, 選択すべき重大事故の取りこぼしを低減する。

表3は, 提案手法に解探索空間の絞り込みを含めて求めた, 6機30母線系統の重大線路事故の候補である。この結果は, 初めの50世代までを絞り込みを行わずに探索を行い, その後の51世代から100世代までを絞り込みを行ったものである。図7の適合度 ΔV_{ij} の推移からもわかるとおり, 35世代付近で事故 (#38, #38) が発見され, 続いて80世代付近で事故 (#10, #10) を見いだしている。この結果から, スキーマ定理を応用した解探索空間の絞り込みが, 重大線路事故の取りこぼしの低減に有効であることがわかる。

図8に, 表3に示した重大線路事故の候補が真に過渡安定度を低下させるものかどうかを確認するため, 動特性シミュレーションの結果の一部を示している。シミュレーションでは, 2線路が同時に三相地絡事故を起こし, 0.1秒後に同時に除去されて, 再閉路はされないものとした。結果は, 事故 (#38, #38) により発電機の脱調は引き起こされないが, すべての発電機を大きく動揺させることを示した。また, 事故 (#10, #10) の場合, シミュレーションに含まれる潮流計算が収束しなかったため動揺現象を確認できなかったが, この送電ルートの系統における位置から実際には発電機 G_4 を脱調させる厳しい事故と予想される。事故選択指標 ΔV_{ij} の小さい, 提案手法では選択されなかった二重線路事故 [例えば, 事故 (#8, #9)] についても幾つかシミュレーションを行ってみたが, ほとんどの場合, 発電機の動揺は小さかった。ただし, ΔV_{ij} は小さいものの, 大きな動揺を発生させる事故 [例えば, 事故 (#1, #1)] も幾つか見られた。これは, 提案手法で用いた事故選択指標 ΔV_{ij} が過渡安定度を近似的に評価しているためと考えられる。これらの動特性シミュレーションから, 提案手法はほぼ妥当な重大線路事故の候補を選択しているといえる。

5. む す び

本論文では, GA の特徴が重大線路事故選択に望まれる条件と整合性のあることに注目し, 過渡安定度余裕を悪化させる危険性のある重大線路事故をGAを用いて発見する手法を提案した。加えて, 選択すべき事故の取りこぼしを低減する手段として, スキーマ定理に基づく解探索空間の絞り込みの可能性を示した。なお, 本論文で用いた重大線路事故の選択指標 ΔV_{ij} は, 近似的に過渡安定度を評価するものであり, 本手法の精度を更に向上させ, 実用的な手法とするためには, ΔV_{ij} に発電機慣性やじょう乱の大きさ, 故障および故障後の系統状態量の軌跡に関する効果も含める必要があろう。また, より大きな規模の系統に提案手法を適用して, その実用性を検討する必要がある。

最後に, 本研究を行うにあたり貴重な御意見をいただいた東北電力(株)電力技術研究所電力研究室の方々に謝意を表する。

(平成5年8月27日受付, 同6年4月26日再受付)

文 献

- (1) 関根 編: 現代電力輸送工学, p.9 (平4) オーム社
- (2) 奈良・北川・石原: 「遺伝アルゴリズムによる配電系統の損失最小化」, 電気学会電力技術研資, PE-92-108 (平4)
- (3) 灰田・穂本: 「Genetic Algorithmsを用いた電力系統の電圧適正化について」, 平3電気学会全大, p.1118
- (4) 高野・斎藤・豊田: 「電力システムのセキュリティ評価への遺伝アルゴリズムの応用」, 電気学会電力技術研資, PE-92-90 (平4)
- (5) 高野・斎藤・豊田: 「(N-2) セキュリティに基づく想定事故選択法への遺伝アルゴリズムの応用」, 平5電気学会全大, p.1186
- (6) D.E. Goldberg: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning (1989) Addison-Wesley Publishing Company
- (7) T. Athay, R. Podmore & S. Virmani: "A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability", *IEEE Trans. Power Apparatus. Syst.*, PAS-98, No. 2, 573 (1979)

付 録

多機系統における ΔV_{ij} を正確に求めるためには, 事故中および事故除去後の解の軌跡を求める必要があるが, 本論文では以下に述べる簡略化した ΔV_{ij} を用いている。

まず, 負荷を定インピーダンス表現した後, 負荷母線と発電機端子母線を縮約した系統モデルを構成する。また, 発電機は過渡リアクタンス背後電圧一定モデルで表す。この系統モデルの動揺方程式群をエネルギー積分して, 系統のポテンシャルエネルギーを求めると次式を得る。

$$\begin{aligned}
 V_p(\delta'; G, B) &= \sum_{k=1}^n (P_{mk} - E_k^2 G_{kk}) (\delta'_k - \delta'_{k0}) \\
 &+ \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n E_k E_l B_{kl} \{ \cos(\delta'_k - \delta'_l) - \cos(\delta'_{k0} - \delta'_{l0}) \} \\
 &- \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n E_k E_l G_{kl} \int_0^{\tau} \sin(\delta'_k - \delta'_l) (\delta'_k + \delta'_l) dt \\
 &\dots\dots\dots (付1)
 \end{aligned}$$

ここで、 P_{mk} , E'_k , δ'_k , δ'_{k0} : 発電機 # k の原動機入力、背後電圧の大きさ、位相角および運転平衡点における位相角、 G , B : 縮約系統のコンダクタンス行列とサセプタンス行列

(付1)式の第3項の値を求めるには事故中の動特性シミュレーションを必要とするので、この項を無視する。また、多機系統では安定平衡点の回りに多数の極大点や鞍点が存在するので、一機無限大母線系統のように一つの不安定平衡点におけるポテンシャルエネルギーから ΔV_{ij} を定義しにくい。

そこで、(付1)式の第3項を除いた部分の関数形のみを利用して多機系統の重大線路事故選択指標 ΔV_{ij} を次のように定義している。

$$\begin{aligned} \Delta V_{ij} = & - \sum_{k=1}^n (G_{khi} - G_{khn}) E_k'^2 \delta'_{k0N} \\ & + \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n E_k' E_l' (B_{klij} - B_{kln}) \cos(\delta'_{k0N} - \delta'_{l0N}) \\ & \dots\dots\dots (\text{付2}) \end{aligned}$$

ここで、 G_{khn} , B_{kln} : 事故発生前のコンダクタンスとサセプタンス、 G_{khi} , B_{klij} : 送電ルート # i と # j の2回線事故除去後のコンダクタンスとサセプタンス、 δ'_{k0N} : 事故発生前の運転点における発電機 # k の位相角

斎藤 浩海

(正員) 1960年7月19日生。1989年3月東北大学大学院博士課程修了。同年4月同大学工学部助手、1992年4月同電気工学科助教授、現在に至る。工学博士。

高野 豊

(正員) 1969年1月27日生。1991年3月東北大学工学部電気工学科卒業。1993年3月同大学大学院博士前期課程修了。同年4月北陸電力(株)入社、現在に至る。

豊田 淳一

(正員) 1934年7月9日生。1963年3月東京大学大学院博士課程修了。同年4月成蹊大学工学部電気工学科助教授、1972年4月同教授。1983年4月東北大学工学部電気工学科教授、現在に至る。工学博士。IEEE, CIGRE SC 39 会員。