

多目的意思決定の配電系統運用への適用 —進化計算の応用—

関崎 真也

本稿では、意思決定者がもつ複数の目的に対する多属性の選好を意思決定に反映させる適用事例として、配電系統運用における多目的意思決定手法を紹介する。配電系統運用者のもつさまざまな目的について一般的な見地から説明するとともに、実用時間内での意思決定を可能にするために進化計算を応用した多目的最適化手法を用いる意義について述べる。また、進化計算手法により得られたパレートフロンティアから運用者の選好を反映させた解を同定する数値例を示し、配電系統運用において多目的意思決定が有用である場合があることを示す。

キーワード：配電系統運用，多目的最適化，進化計算

1. はじめに

2011年に発生した東日本大震災を契機として、わが国では“電力システム改革”が進められており、再生可能エネルギーの大量導入や、電力自由化の推進など、日本の電力システムは大きな変革を迫られている。エネルギー基本計画の方針に基づき経済産業省によって2015年に策定された“長期エネルギー需給見通し”[1]では、太陽光発電システムは住宅用・非住宅用を合わせて6400万kWの導入が見込まれており、2010年時点での第3次エネルギー基本計画に示された5300万kWを上回る数値となっている。

このような再生可能エネルギーの導入が急速に進行している状況の下で、需要家へ電力を供給する役割を担う配電系統において種々の問題が生じうることが懸念されており、従来の運用形態では効率的に配電系統を運用することが難しくなっている。たとえば、低圧配電系統に接続された再生可能エネルギーなどの発電設備による配電線電圧の電圧上昇・変動がそれにあたり[2]、法的に規制されている適正範囲内への電圧維持が課題の一つとなっている。蓄電池による余剰電力の吸収やパワーエレクトロニクス機器を用いた無効電力制御、あるいは配電系統内に設置されている設備を用いることで、電圧上昇・変動の抑制自体は技術的に可能ではあるが、コストの問題などの実運用面での課題が残っている。

わが国の電力システムを取り巻く現状を鑑みると、

金銭的・人的コストなどの経済性を考慮しつつ、既存技術（あるいは設備）と新規技術（あるいは設備）を適切に用いて再生可能エネルギーが導入された配電系統を効率的に運用していくことが重要であるように思われる。ただし、その場合においても、電力システムはインフラとしての側面をもつため、供給安定性、経済性、環境保全¹をはじめとする複数の重要な目的を同時に達成することが求められることは言うまでもない。このように、配電系統運用においては多様な目的が存在するため、運用者が複数の目的の各々に対してもつ水準を満足させる多目的意思決定アプローチが重要となると考えられる。本稿では、運用者の水準を配電系統運用に反映させた多目的最適化問題の適用事例を紹介する²。

本稿の内容は下記のとおりである。2節では配電系統運用における複数の目的とその詳細について述べる。3節では、多目的意思決定の概要について述べ、配電系統運用において運用者の選好を反映させた解を同定する手法の一例を紹介する。4節では、進化計算を応用して準パレート最適解から成るパレートフロンティアを実用時間内に求める手法例を紹介する。5節では数値計算例を示し、6節にて本稿を概説する。

¹ いわゆる 3E (Energy security, Economic growth, Environmental conservation) と呼ばれ、これに Safety を加えた 3E+S が電力システムの基本となっている。

² 本稿の目的は適用事例の紹介であるため、可能な限り図表を使用し、異分野の読者でも理解しやすいよう平易な説明を心がけた一方、実用上の制約などの公開が難しい情報については記述することを避けた。興味がある読者は、電気学会などから出版されている技術報告書を参照されたい。

表 1 配電系統運用者のもつ複数の目的の一例

番号	目的	目的関数
#1	エネルギー効率化・省エネルギー	配電線損失* ¹ 最小化
#2	金銭的コスト低減	配電線損失最小化
#3	CO ₂ 削減・環境負荷の低減	配電線損失最小化
#4	設備コスト（製造・リプレース）低減	設備寿命最大化／増設設備最小化
#5	設備メンテナンスコスト（人的・金銭的コスト）低減	設備寿命最大化
#6	需要家満足度の向上	電力品質水準の維持・向上
⋮	⋮	⋮
#n-1	環境保全／需要家からの要求の満足	再生可能エネルギー導入量最大化
#n	電力の安定供給	異常時の停電時間最小化

*1: 配電線を通る電流 I と配電線抵抗 R により生じるジュール熱損失 RI^2

2. 配電系統運用

2.1 複数の運用目標

配電系統は、発電・送電・配電に大別される電力系統の中で低圧需要家に最も近く、最終的に電力を低圧需要家へ供給するための重要な系統と位置づけられる。図 1 に示した配電系統概要図のように、より上位の系統と配電系統は配電用変電所を介して連系しており、配電用変電所から需要家までのびた配電線を通じて電力が供給される。配電系統内の需要家は、常時は複数の配電用変電所のいずれかから電力の供給を受けており、安定的に電力が供給されるよう、運用者によって適切な設備形成と運用が行われている。

配電系統運用者は、電力の安定供給を第一としつつ、その他の目的を達成するように配電系統を運用している。表 1 に配電系統運用者がもちうる複数の目的の一例を示す³。

2.2 区分開閉器を用いた配電系統運用

次に配電系統運用の具体例について述べるが、現実の配電系統運用者が行っている業務は電力の安定供給を実現するために複雑かつ細分化されたものになっており、また外部に公開されていない情報も多いため、本稿では学術論文などの出版物で取り上げられている、区分開閉器を用いた運用⁴を一例として紹介する。

図 1 に示したように、配電線上には区分開閉器と呼ばれる機械的構造をもつスイッチが複数存在し、開閉器を入切することで配電線上の電流の流れを管理することが可能になる。区分開閉器の操作は配電系統の部分的な工事や保守作業、あるいは断線や停電などの故

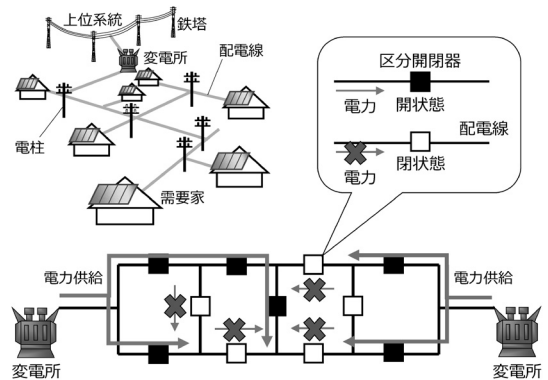


図 1 配電系統の概要図

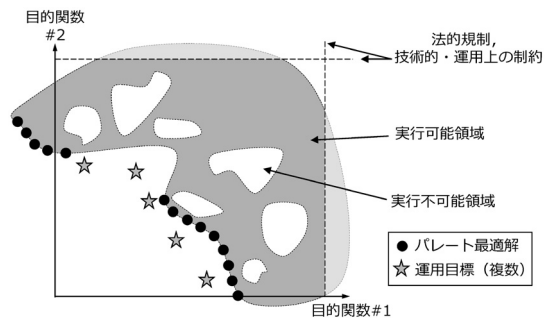


図 2 配電系統運用における多目的最適化の概要図

障発生時の復旧などに用いられるが、常時は配電系統に連系されたすべての需要家へ電力供給を行うため、配電系統運用者によって適切にその開閉状態が決定されている。この区分開閉器を操作し、配電系統トポロジーを変更することで、配電線損失や電圧分布の改善などを達成しようとする試みが先行研究で実施されている [3–8]。特に、表 1 に示したように配電系統運用者は複数の目的を有していることが一般的であるため、多目的最適化としての定式化が先行研究では多く見られる [9–12]。この場合、配電系統運用者の意思決定関

³ ただし、実運用上はより細分化された目的に対応する目的関数が存在すると考えることが自然である。

⁴ “運用” という用語の定義は運用者によって異なるが、本稿では一般用語としての“運用”を用いることとする。

題は、複数の目標を同時に達成するための配電系統トポロジーの決定問題となる。

図2は配電系統運用に関する多目的最適化問題の実行可能領域とパレート最適解の概要図である。ここでは簡単化のために2目的としているが、実際には多くの目的関数が存在し、配電系統運用者はこれら複数の目的に対し所望の水準を有していると考えられる。図2において、実行可能領域をグレーで塗りつぶされた領域として示しており、法的規制や技術上・運用上の制約による実行不可能領域が存在する。また、配電系統トポロジーは区分開閉器の開閉状態（開あるいは閉の2状態）の組み合わせとして表現されるため、離散的かつ非凸の解空間となり、実行不可能領域が至るところに存在する。そのため、パレートフロンティアは著しく歪んだものになり、運用者が事前にパレート最適解の存在領域を把握することや、運用者の選好を反映した重みを用いた単目的最適化問題の採用は困難となる。そのため、次節に示すように、多目的意思決定アプローチを用いた配電系統トポロジーの最適化が有効であると考えられる。

3. 多目的意思決定

本節では、一般的な多目的最適化について簡単に述べ、配電系統運用へ適用する際の一手法を説明する。

3.1 多目的最適化

一般的に、 k 目的の最適化問題は(1)~(4)のように表現される。

$$\underset{\mathbf{x}}{\text{minimize}} \quad \mathbf{z}(\mathbf{x}) = \{z_1(\mathbf{x}), \dots, z_k(\mathbf{x})\} \quad (1)$$

$$\text{subject to} \quad \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \quad (2)$$

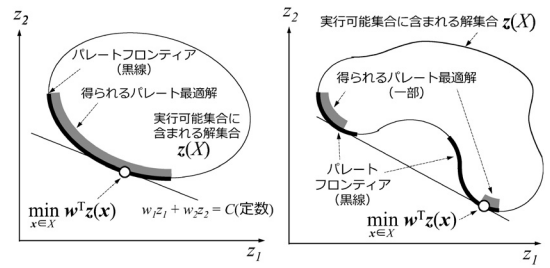
$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (3)$$

$$\mathbf{x} \geq \mathbf{0} \quad (4)$$

ここで、目的関数 $\mathbf{z}(\mathbf{x}) = \{z_1(\mathbf{x}), \dots, z_k(\mathbf{x})\}$ は k 次元ベクトルであり、決定変数 $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_n\}$ $\geq \mathbf{0}$ は n 次元ベクトル、不等式制約 $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \{g_1(\mathbf{x}), \dots, g_l(\mathbf{x})\}$ は l 次元ベクトル、等式制約 $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \{h_1(\mathbf{x}), \dots, h_m(\mathbf{x})\}$ は m 次元ベクトルである。ここで、(5)を満たす集合 X を実行可能集合とする。

$$X = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n | \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}, \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}, \mathbf{x} \geq \mathbf{0}\} \quad (5)$$

もし、(6)のようにすべての目的関数 $z_1(\mathbf{x}^*), \dots, z_k(\mathbf{x}^*)$ を同時に最小化可能な解 \mathbf{x}^* が実行可能集合 X に含まれていれば、解 \mathbf{x}^* は多目的最適化問題の完全最適解となり、意思決定者は解 \mathbf{x}^* を選択すればよいことは自明である。



(a) 解空間が凸の場合 (b) 解空間が非凸の場合

図3 重みを用いた単目的最適化問題への変換

$$z_i(\mathbf{x}^*) = \min \{z_i(\mathbf{x}) | \mathbf{x} \in X\}, \quad i = 1, \dots, k \quad (6)$$

しかし、一般的に複数の目的関数の間にはトレードオフの関係が存在するため、(6)を満足する場合は極めて稀である。したがって、多目的最適化問題では、実行可能集合に含まれる解 $\mathbf{x} \in X$ から次のように定義されるパレート最適解を効率的に見つけ出すことが重要となる。

定義1 (パレート最適解)。

$$z_i(\mathbf{x}) \leq z_i(\mathbf{x}^*), \quad i = 1, \dots, k \quad (7)$$

$$z_i(\mathbf{x}) < z_i(\mathbf{x}^*), \quad \exists i = \{1, \dots, k\} \quad (8)$$

が成り立つ $\mathbf{x} \in X$ が存在しないような $\mathbf{x}^* \in X$ をパレート最適解という。

3.2 パレート最適解の導出

パレート最適解を導出する方法としては、古典的には重みを用いた単目的最適化問題への変換 [13] をはじめとするいくつかの手法が存在しており、ここでは重み係数法を例として説明する。目的関数に対する選好のトレードオフの関係を反映させた重みベクトルを $\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_k)^\top$ とすると、(1)~(4)は(9)に示すように単目的最適化問題に帰着する。ここで \top は転置を表す。

$$\underset{\mathbf{x} \in X}{\text{minimize}} \quad \mathbf{w}^\top \mathbf{z}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^k w_i z_i(\mathbf{x}) \quad (9)$$

解空間が凸である場合、(9)の単目的最適化問題の解は元の問題(1)~(4)のパレート最適解の一部と等しくなる。したがって、重みベクトル \mathbf{w} を任意の値へ変更し、繰り返し単目的最適化問題を解くことで、図3(a)のように重みベクトル \mathbf{w} に対応するパレート最適解を導出することができる。また、各目的関数に対する意思決定者の選好を反映させた重みベクトル \mathbf{w} が適切に設定できるのであれば、単目的最適化問題の解が所望

の解と一致するため、これを意思決定者が満足する解として選択すればよい。一方、解空間が非凸である場合、重みベクトル w を変更したとしても得られるのは図 3(b) のようにパレート最適解の一部のみであり、適切にパレートフロンティアを導出することはできない。

本稿で取り扱う配電システムトポロジーの決定問題は非凸であるため、重みを用いたスカラー化手法を採用することは適切でなく、また前述 (図 2) のように解空間上の至るところに実行不可能領域が存在するため、目的関数間のトレードオフの関係を反映させた重みベクトルを配電システム運用者が事前に設定することも困難である。したがって、配電システム運用者の選好を適切に反映させた解を単目的最適化問題として選択することは必ずしも適切とは言えず、むしろ、パレートフロンティアの概形を示し、その中から最も運用者の選好に近いものを選択することが実運用上自然であると考えられる。配電システムトポロジーの決定問題におけるパレート最適解の導出手法については 4 節にて説明する。

3.3 運用者の選好の反映

多目的意思決定において、得られたパレート最適解集合から運用者の選好を反映させた解を選定する複数の方法が考案されている [13–15]。ここでは 5 節での数値計算例に使用している基準点法 (reference point method; Wierzbicki [15]) について簡単に述べる。本手法は、運用者によって指定された基準点を対話的に変更して最終的に望ましい解を選定するものである。 k 次元空間における基準点を $\hat{z} = \{\hat{z}_1, \hat{z}_2, \dots, \hat{z}_k\}$ とした場合、パレート最適解としては、各目的関数について参照点 \hat{z} に近いものを選択することが望ましい。そこで、基準点 \hat{z} からの距離が最大となる目的関数について、その目的関数と基準点との距離を最小化するパレート最適解を選択することを考える。これは、ミニマックス問題 (10), (11) を解くことで得られる。

$$\underset{\mathbf{x}}{\text{minimize}} \quad \max_{i=1, \dots, k} \{z_i(\mathbf{x}) - \hat{z}_i\} \quad (10)$$

$$\text{subject to } \mathbf{x} \in Y \subseteq X \quad (11)$$

\mathbf{x} は決定変数、 Y は (1)~(4) のパレート最適解集合、 $z_i(\mathbf{x})$ は \mathbf{x} が与えられた場合における i 番目の目的関数である。(10), (11) を解くことで得られた \mathbf{x} に運用者が満足しなかった場合、運用者は得られた \mathbf{x} をもとに新しい基準点 \hat{z} を指定し、対応する解を再度 (10), (11) を用いて計算する。この操作を繰り返し行い、最終的に得られた \mathbf{x} に運用者が満足した場合、それが運用者の選好を反映させた満足解 \mathbf{x}^* となる⁵。

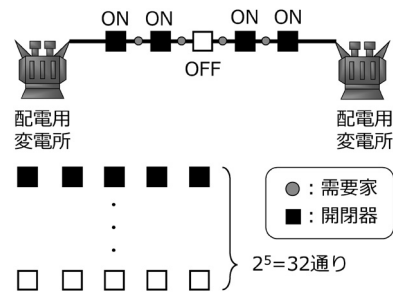


図 4 区分開閉器の開閉状態の組み合わせ例

3.4 配電システム運用における多目的意思決定

本稿では、配電線損失最小化と、配電用変電所に設置されたタップ変圧器⁶の動作回数最小化という複数の目的を一例として紹介する。このとき、決定変数は区分開閉器の開閉状態となり、配電システムトポロジーを決定する問題となる。いま、区分開閉器の数を n とすると、すべての区分開閉器の開閉状態の組み合わせは、 2^n となる。そのため、この問題は NP 困難の問題となり、実用時間内に厳密解を求めることは難しい。実運用の観点からは、メタヒューリスティクス手法を用いた近似解法や、木構造を利用した効率的なトポロジー探索手法 [18] がこれまでに提案されている。

4. 進化計算を用いた多目的意思決定

本節では、非凸である配電システムトポロジー決定問題において実行可能領域の探索が困難であることを示したうえで、進化計算手法の中でも多目的最適化に用いられる NSGA-II (non-dominated sorting genetic algorithm-II) [19] を用いて、準パレート最適解を探索する手法例を紹介する。

4.1 実行可能解の探索

4.1.1 問題の非凸性

問題の非凸性を示す例として、変電所が 2 カ所、区分開閉器が五つ存在する単純な配電システム (図 4) を考える。区分開閉器の開閉状態の組み合わせは、 $2^5 = 32$ 通り存在するが、このうち、すべての需要家へ電力を供給可能なトポロジーは 6 通りに過ぎず、ループ運用⁷を回避可能な実行可能解は五つのみである。割合でいう

⁵ 意思決定者の選好を反映させた解を選択する手法の詳細については [13–15] を参照されたい。

⁶ 変圧比を切り替え可能な機械的な構造をもっている変圧器であり、需要の大きさに応じて動作し、配電線上の電圧を適切範囲内に維持している [16, 17]。

⁷ 複数の変電所から電力を供給する (ループ運用) ことは信頼度の観点から望ましくないため、一般的に常時は放射状で運用されている。

と実行可能解は全体の 15.6% ($\frac{5}{32} = 0.156$) に過ぎず、この例からわかるように、配電系統トポロジーの実行可能解の探索は、それ自体が難しい問題であることがわかる。配電系統トポロジー決定問題は上記の問題構造をもっているため、実行可能解を効率的に生成する手法がこれまで考案されている。たとえば、需要家への電力供給を可能にするトポロジーはグラフ理論でいう全域木となるため、グラフ理論を用いた手法などが先行研究では用いられている [18]。

4.1.2 問題がもつ非線形性

配電系統運用では、設備コスト、運用コスト、人的コストの最小化をはじめとする複数の運用目標が存在するが、これらの目的関数が線形で表現できるとは限らない。また、制約条件には配電線電圧や線路電流の上下限値が含まれるが、こちらも同様に線形で適切に表現できるとは言いがたい。たとえば、配電系統状態（電圧分布や線路電流など）を詳細に計算するためには電力潮流計算が必要になるが、非線形項を含む電力潮流計算の解を求めるためには、Newton-Raphson 法などの反復計算 [11] や、線形近似を用いた近似計算が必要になるが、前者は計算負荷の面で、後者は解の精度の面で課題がある。このような場合、パレート最適解の探索に時間がかかる、あるいは得られた解が実行可能領域に含まれない場合が探索過程で頻発するなどの問題が生じるため、パレート最適解の探索のみならず、実行可能解の探索そのものが難しいものになる。

4.1.3 進化計算の適用

配電系統トポロジーの決定問題には上述のような問題があるため、厳密解を実用時間内に求めることは容易ではない。そのため、実用時間内に、準パレート最適解を見つけることが先行研究では試みられていることが多く、そのための手段として進化計算を用いたメタヒューリスティクス手法が採用されている場合が多い [11]。本稿では、一例として多目的最適化に用いられることが多い NSGA-II を用い、配電系統運用に関するパレート最適解を発見する手法を紹介する。

4.2 NSGA-II を用いた準パレート最適解の探索

NSGA-II は、Srinivas et al. が考案した NSGA (nondominated sorting genetic algorithm) [20] に対して高速非優越ソート、エリート保存戦略、混雑度トーナメント選択を導入した進化的多目的最適化アルゴリズム [19] である。NSGA-II では混雑度を用いて多様性を維持しており、配電系統トポロジー決定問題のように実行不可能領域が多数存在していたり、解空間が非凸であるような場合でも、パレート最適解の探索が

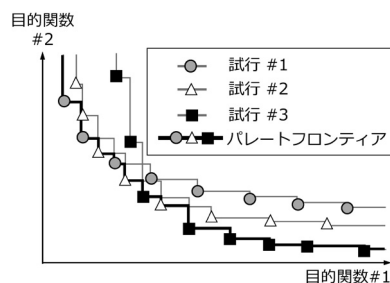


図 5 複数試行で得られた準パレート最適解の統合

比較的容易であるという特徴がある。

4.2.1 NSGA-II におけるコード化

区分開閉器の開閉状態は、一つの区分開閉器に対して 2 通りであるため、コード化するにあたっては染色体の 1 を開状態に、0 を閉状態に対応させる。この染色体をもつ個体を親とし、交叉および突然変異の操作を実施し、準パレート最適解を探索していく。ただし、配電系統トポロジーの決定問題においては、需要家への電力供給を必ず達成するように制約条件が設けられ、実行可能領域は変電所および需要家が存在する地点をノードとした場合に全域木となるように構成されたトポロジーとなる。そのため、交叉や突然変異においては放射状構成を保ちつつ、トポロジーが全域木となる個体が生成されることが望ましい。この制約は厳しいが、古典的に最小全域木問題に使用されている Prim 法をベースとした手法など、さまざまなものが提案されている [21]。

4.2.2 ランク 1 個体の統合

NSGA-II は確率的な操作を含む最適化アルゴリズムであるため、NSGA-II により得られる準パレート最適解（ランク 1 の個体の分布や数）は個体数などに依りて異なる。そのため、1 試行で得られた準パレート最適解が真のパレート最適解から乖離している可能性がある。可能な限り真のパレート最適解近傍のパレートフロンティアを見つけるために、異なる条件で複数の数値計算を実行し、得られた複数の準パレート最適解から適切にパレートフロンティアを選定する必要がある。そこで、図 5 に示すように、個体数などを変更した試行を複数回実施し、得られた準パレート最適解を統合する操作を行う。統合の操作は、複数試行により得られた準パレート最適解のうち、ほかの解に支配されない解を選定していくことで行う。これにより、より真のパレート最適解に近い準パレート最適解から成るパレートフロンティアが得られる。

4.3 より選好に近い解の探索

NSGA-IIは確率を用いた進化計算アルゴリズムであるため、4.2節で求めた準パレート最適解は確率的に探索したものであり、意思決定者の選好を満たす、あるいは選好に近いパレート最適解がその中に含まれるとは限らない。そのため、得られた準パレート最適解の情報を用いて、意思決定者をもつ選好情報に基づく局所探索を行うことが望ましい。ただし、区分開閉器を n 台もつ配電システムでは、あるトポロジーの近傍解（一つの区分開閉器状態を変更したものは n 個存在するが、近傍解は制約を満たさない⁸。したがって、全域木であるためには近傍解のさらに近傍解を探索する必要があるが、その解候補の数は n^2 個である。近傍解のさらに近傍解に良好な解がなければさらにその近傍解の近傍解を探索しなければならないため、解候補の数は指数関数的に増加していく。この事実からわかるように、配電システムトポロジーの決定問題において近傍探索は計算負荷が大きい。本稿の範囲を超えるためここでは近傍探索については取り扱わないが、配電システム運用者の選好を適切に反映させるためには、効率的な近傍探索アルゴリズムが重要になる。

5. 数値計算例

複数の配電用変電所に設置された変圧器が12台、区分開閉器が120台、需要家が連系しているノードを112個とした配電システムモデルを用いた数値計算例[22]を示す。目的関数は一例として、配電線損失最小化と12台の配電用変圧器のそれぞれの動作回数最小化とする。この問題例は13目的の多目的最適化問題となり、決定変数は120台の区分開閉器の開閉状態である。区分開閉器の開閉状態に対応した配電システムトポロジー候補の総数は $2^{120} = 1.3 \times 10^{36}$ だけ存在し、実行時間内にすべての解候補に対して目的関数値を計算することは困難であるため、NSGA-IIを用いて準パレート最適解を計算した数値例を示す。なお、初期個体に実行不可能解が含まれていると学習が著しく非効率になるため、本数値計算例では、ダイクストラ法[23]を用いて全域木構造が保証された初期個体を生成した。ただし、全域木構造を満たす個体であってもそのすべてが非優越解であるとは限らないため、最大個体数よりも初期個体数は小さくしていることに注意されたい。探索は最大世代数で打ち切るものとし、十分に収束するように最大世代数を決定した。数値例においては、4.2.2節で述べたように個体

⁸ 全域木に対して一つのエッジを除去あるいは追加した場合、全域木とはならない。

表2 ケース別結果

ケース	最大個体数	初期個体数	ランク1個体数
1	200	120	178
2	150	84	135
3	100	68	95
4	50	31	47

数を変えた4ケースについて複数回の試行を行い、準パレート最適解を統合する。得られた結果を表2に示す。

表2より、NSGA-IIを用いることで複数の準パレート最適解が得られていることが確認できる⁹。次に、3.3節にて述べたように、得られた準パレート最適解から意思決定者の選好を反映させた解を選定する。一例として、配電システム運用者が変圧器#1, 6, 9, 12のタップ動作回数を最小化したいと考えているものとする。想定される状況としては、変圧器#1, 6, 9, 12のタップ動作回数がほかの変圧器#2, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 11よりも多いような場合が考えられる。この選好を反映させ基準点#1として $\hat{z} = \{\hat{z}_1, \hat{z}_2, \dots, \hat{z}_{13}\}$ を決定する。 \hat{z}_1 は配電線損失の基準点を、 $\hat{z}_{i+1}, i = 1, 2, \dots, 12$ は変圧器# i のタップ動作回数の基準点を示している。ここでは、 $\hat{z} = \{4.00 \times 10^4, 0, 3, 2, 3, 2, 1, 4, 2, 0, 2, 3, 0\}$ と設定した。(10)を解くことで得られた解を表3に示す。表3より、変圧器#1, 6, 9, 12のタップ動作回数は0回あるいは1回となっており、ほかの変圧器の動作回数よりも小さい傾向となっていることが確認できる。別の例として、配電線損失および変圧器#2, 6, 7のタップ動作回数の最小化を目的とした配電システム運用者の場合、基準点#2を $\hat{z} = \{3.80 \times 10^4, 3, 0, 3, 2, 2, 0, 0, 2, 3, 3, 2, 3\}$ と設定して得られた解を表3に示す。表3より、配電システム運用者の選好を反映させた解を同定できている。これらの結果より、進化計算アルゴリズムのNSGA-IIを用いて求めたパレートフロンティアの概形から、配電システム運用者の選好を反映させた解を選定することが可能であることを確認した¹⁰。

6. おわりに

本稿では、進化計算を用いた多目的最適化手法の応用事例として、配電システムトポロジーの決定問題を紹介し、具体的な数値例を通じて、配電システム運用者の選好

⁹ 本来であればパレートフロンティアが適切に探索できているかをグラフ上で示すべきであるが、本数値例では13目的の最適化問題を取り扱っているため、パレートフロンティアを視覚的に表現することはできない。

¹⁰ 本数値例はロードカーブなどを適当に与えて計算した一例に過ぎず、現実の配電線損失や変圧器タップ動作回数を忠実に再現したものではないことに注意されたい。

表3 運用者の嗜好を反映させることで同定された解 (一例)

	配電線損失 [kWh]	変圧器タップ動作回数											
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
同定解#1	4.58×10^4	0	3	2	4	2	1	5	2	1	2	2	1
基準点#1	4.00×10^4	0	3	2	3	2	1	4	2	0	2	3	0
同定解#2	3.81×10^4	2	1	2	4	2	0	0	2	3	3	2	4
基準点#2	3.80×10^4	3	0	3	2	2	0	0	2	3	3	2	3

を反映させた解を選定可能であることを示した。この分野では数多くの先行研究が存在し、本稿で紹介した以外にもさまざまな手法が提案されているため、興味がある読者は参考文献を参照されたい [9–12]¹¹。

参考文献

[1] 経済産業省基本政策分科会, 長期エネルギー需給見通し小委員会による長期エネルギー需給見通し (2015年7月) 関連資料.

[2] 経済産業省・資源エネルギー庁, 電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン (2016年7月).

[3] C. F. Chang, “Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm,” *IEEE Transactions on Power Systems*, **23**(4), pp. 1747–1755, 2008.

[4] V. Farahani, B. Vahidi and H. A. Abyneh, “Reconfiguration and capacitor placement simultaneously for energy loss reduction based on an improved reconfiguration method,” *IEEE Transactions on Power Systems*, **27**(2), pp. 587–595, 2012.

[5] Y. Y. Hong and S. Y. Ho, “Determination of network configuration considering multiobjective in distribution systems using genetic algorithms,” *IEEE Transactions on Power Systems*, **20**(2), pp. 1062–1069, 2005.

[6] R. A. Jabr, R. Singh and B. C. Pal, “Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming,” *IEEE Transactions on Power Systems*, **27**(2), pp. 1106–1115, 2012.

[7] R. S. Rao, S. V. L. Narasimham, M. R. Raju and A. S. Rao, “Optimal network reconfiguration of large-scale distribution system using harmony search algorithm,” *IEEE Transactions on Power Systems*, **26**(3), pp. 1080–1088, 2011.

[8] R. S. Rao, K. Ravindra, K. Satish and S. V. L. Narasimham, “Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, **28**(1), pp. 317–325, 2013.

[9] A. Ahuja, S. Das and A. Pahwa, “An AIS-ACO hybrid approach for multi-objective distribution system reconfiguration,” *IEEE Transactions on Power Systems*, **22**(3), pp. 1101–1111, 2007.

[10] E. G. Carrano, L. A. E. Soares, R. H. C. Takahashi, R. R. Saldanha and O. M. Neto, “Electric distribution network multiobjective design using a problem-specific genetic algorithm,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, **21**(2), pp. 995–1005, 2006.

[11] A. M. Eldurssi and R. M. O’Connell, “A fast nondominated sorting guided genetic algorithm for multi-objective power distribution system reconfiguration problem,” *IEEE Transactions on Power Systems*, **30**(2), pp. 593–601, 2015.

[12] A. R. Malekpor, T. Niknam, A. Pahwa and A. K. Fard, “Multi-objective stochastic distribution feeder reconfiguration in systems with wind power generators and fuel cells using the point estimate method,” *IEEE Transactions on Power Systems*, **28**(2), pp. 1483–1492, 2013.

[13] M. Sakawa, H. Yano and I. Nishizaki, “Multiobjective linear programming,” *Linear and Multiobjective Programming with Fuzzy Stochastic Extensions*, Springer, pp. 73–103, 2013.

[14] 矢野均, 『不確実状況下における多目的計画問題に対する意思決定手法』, 丸善プラネット, 2015.

[15] A. P. Wierzbicki, “The use of reference objectives in multiobjective optimization,” In G. Fandel and T. Gal (eds.), *Multiple Criteria Decision Making: Theory and Application*, Springer, pp. 468–486, 1980.

[16] Y. P. Agalgaonkar, B. C. Pal and R. A. Jabr, “Distribution voltage control considering the impact of pv generation on tap changers and autonomous regulators,” *IEEE Transactions on Power Systems*, **29**(1), pp. 182–192, 2014.

[17] X. Liu, A. Aichhorn, L. Liu and H. Li, “Coordinated control of distributed energy storage system with tap changer transformers for voltage rise mitigation under high photovoltaic penetration,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, **3**(2), pp. 897–906, 2012.

[18] 湊真一編, ERATO 湊離散構造処理系プロジェクト著, 『超高速グラフ列挙アルゴリズム—〈フカシギの数え方〉が拓く, 組み合わせ問題への新アプローチ—』, 森北出版, 2015.

[19] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **6**(2), pp. 182–197, 2002.

[20] N. Srinivas and K. Deb, “Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms,” *Evolutionary Computation*, **2**(3), pp. 221–248, 1994.

[21] M. Gen, R. Cheng and L. Lin, *Network models and Optimization, Multiobjective Genetic Algorithm Approach*, Springer, 2008.

[22] S. Sekizaki, I. Nishizaki and T. Hayashida, “Multiobjective optimization of distribution network management in deregulated electricity market,” In *Proceedings of 23rd International Conference on Multiple Criteria Decision Making*, 2015.

[23] E. W. Dijkstra, “A note on two problems in connexion with graphs,” *Numerische Mathematik*, **1**, pp. 269–271, 1959.

¹¹ただし、区分開閉器は頻繁に切り替えることを想定しているものではないため、配電系統トポロジーの変更については技術的な課題が残されている。