

多目的最適化手法を用いた配電系統拡張計画

椎野 輝晋*¹ 青木 秀憲*²

Multi-objective Optimization for Distribution Network Expansion Planning by

Terukuni Shiino*¹, Hidenori Aoki*²

(Received on Mar. 26, 2009 and accepted on July 6, 2009)

Abstract

In this paper, Multi-Objective Tabu-GA and Controlled Elitist NSGA are proposed to deal with distribution network expansion planning. The distribution network expansion planning aims at minimization of system cost and distribution loss while satisfying constraints. The problem formulation results in a combinatorial optimization problem. In practice, it is considerably hard to solve problem due to its complexity. As a meta-heuristics method, Genetic Algorithm (GA) is a parallel search method with selection mechanisms for solution candidates and genetic operation mechanisms for selected candidates. The successful GA is equipped the both mechanisms. On the other hand, the tabu search is a powerful one for multimodal and/or multi-objective problems. Based on this, this paper proposes a hybrid genetic algorithm for distribution network expansion planning. Recently, distributed generation (DG) is increasingly being applied in distribution systems due to the deregulated and competitive power markets. Therefore, the allocation of DG that should be considered in the future is investigated.

Keywords: Distribution network expansion planning, Distributed generation, Multiple objective optimization, Pareto optimal solution

1. はじめに

電力システムの末端に位置する配電系統は、発電所から供給された電力を需要家まで届けるための最終過程として、その信頼性が益々求められている。特に電力自由化や環境対策問題などにより、配電系統には分散型電源(Distributed Generation :DG)を積極的に導入する傾向があり、潮流の不確実性が懸念されている。これら DG の設置は、配電損失の低減や変電所負荷削減などの利点を持つ一方で、逆潮流現象や、出力変動などによる電力品質の悪化を招く要因となっている。この問題に対処するには系統構成、DG の設置箇所とその出力などを考慮した検討を行う必要がある。

また、近年の電力需要増大や省エネなどの動向にも目を向けなければならない。例えば、新規負荷参入が急激に進めば、現存の系統では対応不可能となるケースを生じることが予測される。即ち、想定されていない負荷分布により制約が満足できなくなることや配電損失が著しく増加するなど、新規負荷参入による配電系統の複雑化は、今後も一層促進するものと考えられる。従って、この問題についても早い段階に対処する必要がある。

以上、配電系統では上記問題点の改善を図るために配電

系統拡張計画が行われることになる。これは、電圧上下限值、配電線の電力潮流容量などの系統構成上の制約を満足しつつ、系統コスト及び配電損失の最小化を図る複雑かつ膨大な組合せ最適化問題となる。これまで、これに関する研究は多くの最適化手法を用いて検討されている。最近、新規設備となる DG を任意の系統に導入したときの系統拡張計画の最適化が Controlled Elitist NSGA (CENSGA) を用いて報告されている⁽¹⁾。しかし、運用者側では今後、想定される負荷に対する系統拡張計画と同時に、構成された系統のいかなる箇所にもどの程度の出力を持つ DG が参入したとき最も効率良い系統運用が可能であるかを知ることが重要な課題になってくるものと思われる。

本論文では、まず配電系統の拡張計画問題に、これまで行われていない多目的 Tabu-GA を提案する。次に、決定した系統構成に基づき最も効率の良い DG 参入箇所とその出力値の最適化は、CENSGA による手法を適用する。二つの手法によるパレート解集合からの解選択は、これまでのように運用者側に委ねる操作ではなく、 θ -domination 戦略によりその解を 1 つ抽出し、系統構成と DG 導入箇所を決定している。これら二段階探索手順をもつ本手法を 32 ノード放射状配電系統に適用し、その効果について記述する。

* 1 工学研究科電気電子システム工学専攻

* 2 電気電子工学科 教授

2. 配電系統拡張計画

配電系統拡張計画は既存の系統に加え、拡張予定の系統候補を考慮し、系統コスト及び配電損失を制約値内で最小化する問題である。系統を再構成するにあたり、新規設備の拡張候補は非常に多く、その中から最適な配電系統構成を決定する組み合わせ最適化問題となる。以下は配電系統拡張計画の目的関数を定式化したものである。

目的関数：

$$f = [f_1, f_2] \rightarrow \text{Minimize}$$

$$f_1 = g(V, I) + \text{Loss} + l \quad \cdots (1)$$

$$f_2 = g(V, I) + \text{Cost} + l \quad \cdots (2)$$

但し、 f_1 ：損失の目的関数、 f_2 ：コストの目的関数

g ：電上下限規定値制約逸脱量，線路電流制約逸脱量の2乗和， l ：系統に含まれる閉路数

3. 多目的最適化問題

多目的最適化問題とは、トレード・オフの関係(目的関数にある各項の目的が互いに相反する関係)にある複数の評価基準から最適解を求める問題である。この問題では、その性質から解は複数もしくは無限個の集合として存在する。そのため、パレート最適性が重要な概念として挙げられている⁽²⁾。パレート最適性とは、多目的最適化問題において、その解が他の任意の解と総合的に比較して、決して劣らないことを保証したものである。即ち、必ずしも他のどの解よりも優位にあるとは言いきれないが、より優れた解が他には存在しないことがいえる。一般的に、このようなパレート最適性を満足するパレート最適解は複数個あり、これらを集合として求めることが多目的最適化問題において多くの場合、重要な目的となる。

近年、多目的最適化問題に遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm :GA)を適用する多目的GAに関する研究が数多く報告されている^{(1),(3),(4)}。その理由はGAが多探索であり、一度の探索で複数のパレート解集合が求まることにある。

(3・1) 多目的最適化の定義

一般に最適化とは、ある一つの評価基準に対する最適化、即ち単一目的最適化のことを意味する。しかし、実社会に存在する様々な最適化問題は多くの場合、複数の評価基準を同時に考慮すべき問題が数多く存在する。このような複数の評価基準が存在し、これらの評価基準を同時に考慮しながら最適化を行う問題を多目的最適化問題という。

(3・2) パレート最適解の定義

パレート最適解は、多目的最適化問題における解の優越領域により定義される⁽⁵⁾。多目的最適化問題における解の優越関係を以下に記述する。但し、全ての目的の最適化は最小化であると仮定する。

今、解空間 R^j 存在する2つの解 $x^1, x^2 \in R^j$ を考える。この時、解の優越関係は

$$\bullet f_i(x^1) \leq f_i(x^2) \quad (\forall i=1, \dots, j) \quad \cdots (3)$$

の時、 x^1 は x^2 に優越する。

$$\bullet f_i(x^1) < f_i(x^2) \quad (\exists i=1, \dots, j) \quad \cdots (4)$$

の時、 x^1 は x^2 に強い意味で優越する。

但し、 j は考慮される目的関数の数を表す。

この優越の定義より、 x^1 が x^2 に優越しているならば、 x^2 より x^1 のほうが良い解であると判断される。この優越関係に基づく、パレート最適解の定義は次に示される。

$x^0 \in R$ とした時、

• x^0 に強い意味で優越する解 $x \in R^j$ が存在しない時、 x^0 は弱パレート最適解

• x^0 に優越する解 $x \in R^j$ が存在しない時、 x^0 は(強)パレート最適解

4. GA への適応

多目的最適化問題には、唯一の最適解は存在しないことから、多点探索により一度に複数の解を求めることが可能なGAやPSO(Particle Swarm Optimization)が適用される場合が多い。本稿では配電系統拡張計画をGAに基づく多目的最適化手法となる多目的Tabu-GAによって探索を実行する。まず、これまでこの手法に用いられた変数のコーディングについて Fig.1 に示す簡単な配電系統モデルを用いて説明する。同図において実線は、ノード間にブランチがあることを示し、点線はノード間にブランチが存在しないことを意味している。このように、ブランチ状態は2つの変数によって表されることから、0-1変数が適用されることになる。即ち、Fig.2に示すように1つの個体のコーディングは、遺伝子長をブランチ数で表現し、ブランチが存在する場合には1、存在しない場合には0として構成することになる。

今、回路網内の独立した閉路数を l 、ブランチ数を b 、ノード数を n とすると、次式が成立する。

$$l = b - n + 1 \quad \cdots (5)$$

上式より、Fig.1の系統を用いて放射状系統を構成するためのブランチ数を求めると、ノード数 $n=8$ 、閉路(ループ)数 $l=0$ として、得られるブランチ数は $b=7$ である。即ち、ブランチ数が最低7本なければ、放射状制約を満足する系統を構成できないことになる。ここで、Fig.2に示した0-1変数で表されたコーディングに着目すると、この場合の組み合わせ総数は、 $2^9=512$ 通りである。しかしながら、実際に放射状系統を満足する系統を作成するには、9個の遺伝子中、7個の遺伝子が1とならなければならない。そのため、その個数は $C_7=36$ 個となる。この結果から、放射状系統を満足する組み合わせ数が、全体の $36/512=7.03\%$ 程度しか存在しないことを表しており、探索は大幅に阻害されることになる。このような条件のもとでは、確率を用いて大域的探索を行うGAの適用は、不向きなものとなる。その理由は、ビットコーディングされたGAの一部分のみを入れ替える交叉の操作では、0と1の数を入れ替え前後で一定となるという保証がないためである。また突然変異においても、ビット反転を突然変異の操作とする通常のGAでは、0と1の数が異なる要因となる。本論文ではこの問題点の改善を図る

ために、次のようなコーディングが新たに提案されている。

ノード数が一定であれば、ブランチ数も一定になるという点に注目し、ここでは 0-1 変数ではなく、設定するブランチ番号のみに着目してコーディングを行う。即ち、Fig.1 の系統の変数表記は、Fig.3 のようにコーディングすることになる。その際、遺伝子長は、拡張候補のブランチ数からノード数を差し引いた値に 1 をプラスし、求められる。これにより、常に同一のブランチ数の中で最適化手法を適用することが可能となる。但し、探索過程において同一の数字を含む遺伝子が複数発生する可能性がある。このような場合には、ループが存在する形となるため式(1)、(2)によりペナルティが与えられ、その評価値は改悪方向に作用することになる。以上の手法によって、遺伝子操作がより効率的な探索を実現することを期待したものである。

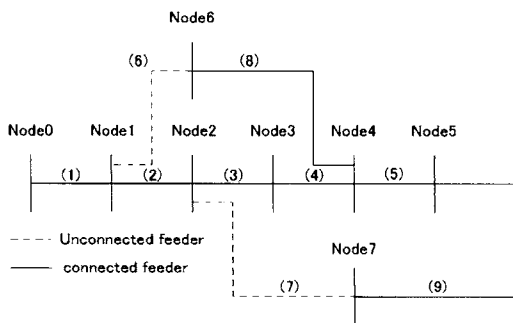


Fig.1. An example of distributed system

$$x^i = \begin{matrix} (1) & (2) & (3) & (4) & (5) & (6) & (7) & (8) & (9) \\ \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{1} & \boxed{1} \end{matrix}$$

Fig.2. An example of coding

$$x^i = \begin{matrix} \boxed{1} & \boxed{2} & \boxed{3} & \boxed{4} & \boxed{5} & \boxed{8} & \boxed{9} \end{matrix}$$

Fig.3. Proposed coding

5. Tabu-GA

GA と SA(Simulated Annealing) さらに、TS 等のハイブリッド化は、GA の持つ優れた大域的探索能力と他の手法の持つ強力な局所探索能力をハイブリッド化することで、それぞれ単体で動作させるよりも優れた探索能力を得ようとするものであった。一方、本稿で適用する Tabu-GA はこのようなハイブリッド化手法とは異なり、TS の操作中にあるタブーリストを利用して、GA が生成する解候補を直接タブーリストの中に格納するアルゴリズムとなっている。以下にその内容について記述する。

タブーリストの役割は次の通りである。

- ・ 世代最良個体のリストへの格納
- ・ 個体群の多様性の維持
- ・ エリート個体の再利用
- ・ 局所解への収束回避

Tabu-GA は従来のハイブリッド手法に比べ、扱いが容易であり、頑健かつ強力な手法である⁽⁶⁾。Tabu-GA は Simple GA

の選択操作のみに改善を行ったものである。そのアルゴリズムは、Fig.4 に示すように長期タブーリストと短期タブーリストに、それぞれ世代の多様な最良解を保存し、それらと同じ解が少なくとも n 世代選択されないようにすることで、繰り返しの初期の段階での局所解への収束を回避することを可能にしたものである。

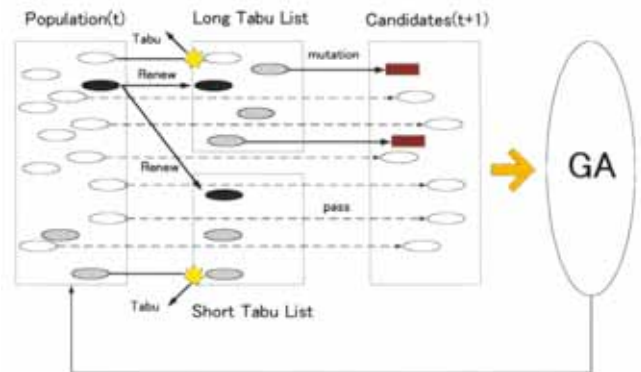


Fig.4. Tabu-GA

〈5・1〉タブーリストの構造

長期タブーリストは、まず探索世代の全てに適用され、設定するタブーリスト数までは最も適応度の高い個体が登録される。その後のタブーリストの更新は、次世代毎に生成される個体中で適応度がこれまで登録されたものより高く、ハミング距離(遺伝子同士のブランチ番号の一致数)が設定値より大きいことが条件となる。また、同一個体の重複登録は禁止されている。一方短期タブーリストでは、登録操作はこれまでと同じであるが、タブーとなる世代数が決定され、さらには同一個体の重複登録も許可されている。なお、その更新については長期タブーリストと同じである。

〈5・2〉多目的 Tabu-GA

Tabu-GA を多目的化に適用したものが多目的 Tabu-GA である。多目的最適化問題では、より良いパレート最適解を得る必要がある。そのため、多目的 Tabu-GA では複数のタブーリストとパレート優先解のためのタブーリストが準備され、これらをマルチクラスタブーリストと呼び、m(目的関数の数)+1 のクラスを持つことになる。Fig.5 は、多目的 Tabu-GA の概念図である。

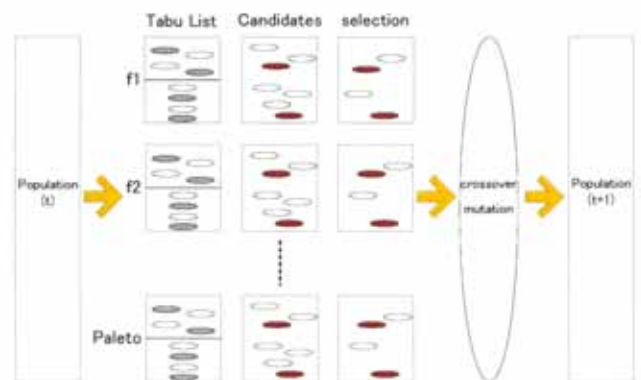


Fig.5. Multi-objective Tabu-GA

6. パレート解の抽出方法

多目的最適化手法を適用する場合、求められる解はパレート最適解集合となるため、これを扱った研究はパレート最適解集合を表示し、その結果を解として位置づけている。しかし、実用的には、最終的に何らかの根拠の基、パレート最適解集合を絞り込み、実行解を得なければならないものとする。本稿ではその方法として、 θ 抽出法を用いてパレート最適解集合の中から実行解の抽出を行っている。

(6.1) 実行解の抽出

多目的最適化手法では、パレート最適解集合の中から意思決定者が、その解を抽出することになる。しかし、解を選ぶ基準が曖昧な場合、意思決定者が全てのパレート最適解集合を比較・検討する必要を生じる。それを決定するための比較作業が極めて困難となることが予想される。そのため、本手法では意思決定が容易に実行できるようにパレート最適解集合にある個々の解に対して、それぞれ順位付けを行う θ 抽出法を適用している。 θ 抽出法は、多目的Tabu-GAとCENSGAによって得られたパレート最適解集合に対して θ -domination戦略と呼ばれるオペレータを導入して、パレート最適解同士を比較する方法となっている。

(6.2) θ -domination戦略

式(3), (4)で示した定義を目的関数にある二次空間として表現すると Fig. 6(a)のように各個体の優越領域は、それぞれ90度の広がりを持つこととなる。多目的最適化手法では、目的関数にある複数の項目を各次元にそれぞれ振り分け、ベクトル最小化の形で最適化を図ることになるので、それぞれの目的関数の境界は直交することになる。このことから、Fig. 6(a)に示すような斜線部に入っていなければ、優越されることがないので、パレート最適解は不揃いな配置となる。そのため、これを利用して何らかの方法で各解に優先順位を付けることが可能となる。ここでは式(3), (4)の優越条件を緩和することによって、それが実行される。

Fig. 6(b)は、優越条件のために導入された角度パラメータ θ を目的関数空間に示したものである。これまでにある優越領域の外側に、角度 θ をとり、これによって与えられた領域を新たな優越条件として定義したものである。

これに基づいて、優越の定義は次のように表現されることになる。

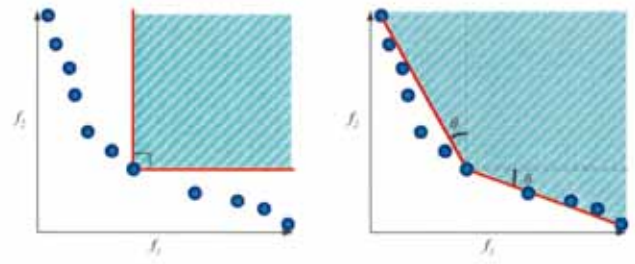
解 $i, j \in R^p$ について、

$$g_i(x^1, x^2) = f_i(x^1) - f_i(x^2) + \sum_{j=1}^K (f_j(x^1) - f_j(x^2)) \cdot \alpha_j, \quad x^1, x^2 \in R^p \quad \dots (6)$$

$$\forall g_i(x^1, x^2) \geq 0, \quad \text{and} \quad \exists g_i(x^1, x^2) > 0 \quad \dots (7)$$

であれば、 x^1 は x^2 を優越する。

但し、 K は考慮する目的関数の数であり、 R^p はパレート最適解集合である。ここで、角度パラメータ θ を、 $0 < \theta < \pi/2$ として優越条件を変化させ、優越される角度が最も大きな解ほど、良好な解になるものとする。



(a) Standard (b) θ -domination
Fig.6. Concept of domination

7. Controlled Elitist NSGA

本稿では、多目的 Tabu-GA によって再構築されたシステムに対して今後大量に連系されると予想される DG の設置箇所と出力値決定はCENSGAと θ -domination戦略を採用している。

多目的最適化手法であるCENSGAは、NSGAIに減少率というパラメータを導入し、下式により次世代母集団に残る個体の数を制限したものである。本稿では紙面の都合上、次世代母集団生成法のみについて記述する。

$$n_i = r n_{i-1} \quad \dots (8)$$

但し、 n_i :ランク F_i に許可される個体数 r :減少率($r < 1$)とし、ランク F_i に存在する個体数を n'_i とおき、 n_i と n'_i を比較する。
 $n'_i > n_i$ 混雑度によるトーナメントを行い、 n_i を生成。
 $n'_i < n_i$ 全ての n'_i の個体数と、残りのスロットの個体数を下式により算出する。

$$\rho_i = n_i - n'_i \quad \dots (9)$$

これにより、次のランクに許可される個体数は次のように表される。

$$n_{i+1} = n_{i+1} \cdot \rho_i \quad \dots (10)$$

以上の概念図を Fig. 7 に示す。

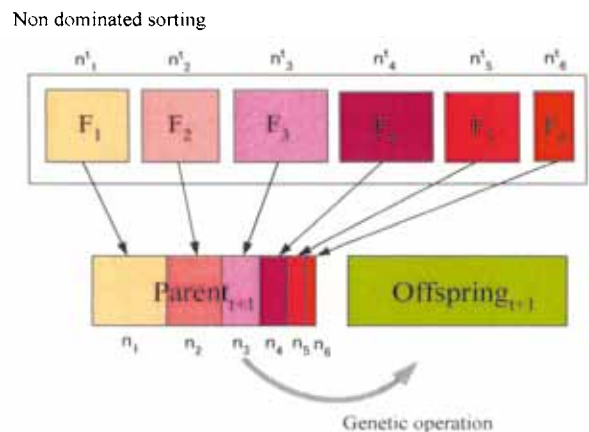


Fig.7. Image of controlled elitist NSGA

8. パレートアーカイブ

一般的な多目的GAにはパレートアーカイブを用いるものが多く、CENSGAにもパレートアーカイブが用いられている。

パレートアーカイブとは探索途中で得られた非劣解を探索個体群とは別に保存する仕組みであり、これにより一度得られた非劣解集合を保持することができるため、探索に後退が生じないというものである。

本稿では、CENSGA がもつパレートアーカイブの他に各世代で探索した全ての非劣解を収集するためのパレートアーカイブを設けている。これらのアーカイブには個体数の制限は設けられていない。これにより、パレートアーカイブで保持する個体が無限に増加することが期待される。Fig. 8 にパレートアーカイブの概念図を示し、小さい箱にはその世代 (1 世代のみ) の探索によって得られた非劣解のみが保存され、大きい箱にはこれまでの探索 (全世代) において得られた非劣解が保存される仕組みとなっている。

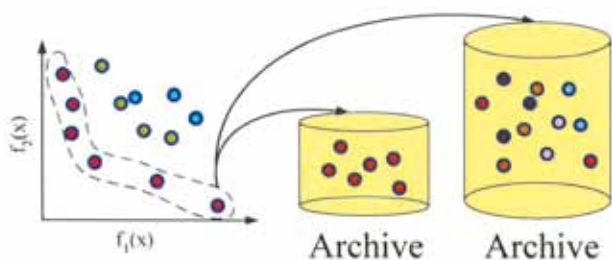


Fig.8. Pareto Archive

9. シミュレーション条件

Fig. 9 は、適用した配電系統モデルである。送り出し電圧 6864[V], タップ比 1.0, さらに線路定数が全て既知である 32 ノード放射状配電系統 (青線) に、13 箇所の新規負荷を想定し、そのブランチ候補 (赤点線) を示したものである。

配電系統拡張計画では、既存系統に対して、将来新たに負荷ノードが参入すると想定される箇所に予想される量の負荷を加え、拡張可能な線路を全て考慮して最適化が行われる。本稿では既存系統にある総負荷 3715[kW] に対して新規負荷を挿入したときの総負荷が 4275[kW] となる場合について既存系統を多目的 Tabu-GA と θ -domination 戦略により再構築することになる。さらに、この系統構成に対して CENSGA と θ -domination 戦略により DG の設置箇所と出力を決定することになる。なお、DG はいずれのノードにも設置可能であり、出力値を 1000[kW] の範囲内で設定している。

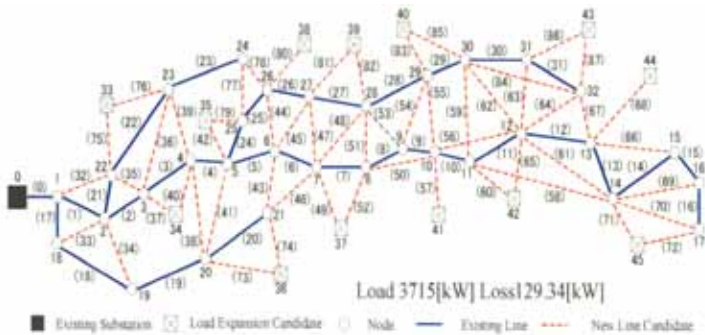


Fig.9. Existing system

10. シミュレーション結果

Table1 は、従来からの 0-1 変数によるビットコーディングと提案する十進法表記コーディングによって得られたパレート最適解数を一様乱数の初期値ごとに比較したものである。これより、提案するコーディング法が、パレート最適解数を多く算出できていることがわかる。これは、放射状制約や電力供給制約などの厳しい制約条件をもつ本問題に GA を適用する場合には、十進法表記を用いたコーディングにより効果的な結果が期待できることを示している。Fig. 10 は、多目的 Tabu-GA により求めた初期値 2.0 のときのパレート最適解集合を示している。さらには、この解集合に θ -domination 戦略を適用し、これにより抽出された実行解 [0.011902, 0.362156] が示されている。この図の右上側に位置する解値はコスト削減を図ることはできるが損失の妥協量を大きくすることになる。また、左上側に位置する解値は、損失の軽減を図ることはできるがコストの妥協量を大きくする。即ち、この両者のバランスを最も平衡する解が、複数の目的関数を同時に考慮した場合の実行解となり、 θ -domination 戦略により算出されることになる。

Fig. 11 は、実行解に対する目的関数にあるコストと損失の妥協量割合を示したものである。左上側の解 (赤) は、コストは高くなるが 61.0% の損失削減を達成できる損失最小系統を構成できる最適解となる。一方、右上側の解 (赤) は、損失は大きいものの 32.2% のコストの削減を達成できるコスト最小系統を構成できる最適解となる。これに対して実行解によるとコストが 53.3% 改善され、妥協量が 7.7% に抑えられている。さらに、損失が 28.2% 改善され、妥協量が 4.0% に抑えられる最適解となっている。

Fig. 12 は、この実行解により再構築された系統構成である。これらの結果から、目的関数にあるコストと損失の削減量は低い妥協量を抑えることができ、合理性が高いものとする。特に、既存系統からのフィーダの除去数が線路番号 (6), (21) の 2 箇所のみとなり、少ないフィーダの張り替え操作でコスト、損失を削減できる組合せとなり、その効果が有用なものとなっていることがわかる。

さらに、この系統構成に対して DG の最適配置と出力値を算出した結果、Fig. 13 に示すように 3 箇所に DG が連系されることになった。Table 2 は、DG の出力を示したものである。Fig. 9 に示す既存系統負荷、損失に対して負荷を 560[kW] 増加したにも関わらず、損失が 119.02[kW], 約 8% 減少することができた。さらに DG 連系後には損失が、28.96[kW] となり既存系統より損失を約 78% 軽減できる結果を得ている。

Table.1 No. of pareto of each method

Random No.	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
Conventional method	13	6	7	6	5	8	12	6	10	6
proposed method	102	104	104	103	103	104	102	86	102	104

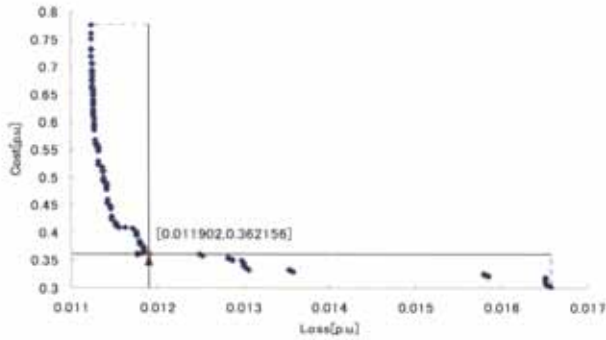


Fig.10. Pareto optimal solution



Fig.11. Quantity of compromise

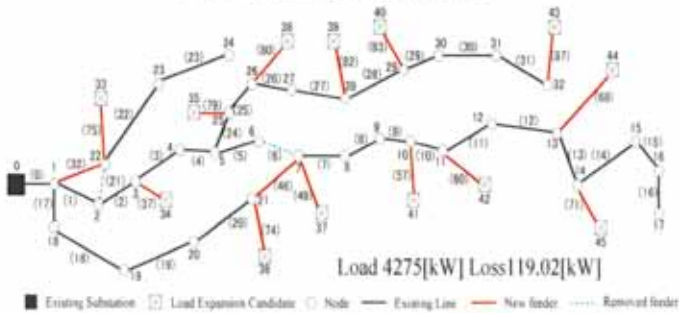


Fig.12. Multiple optimal system

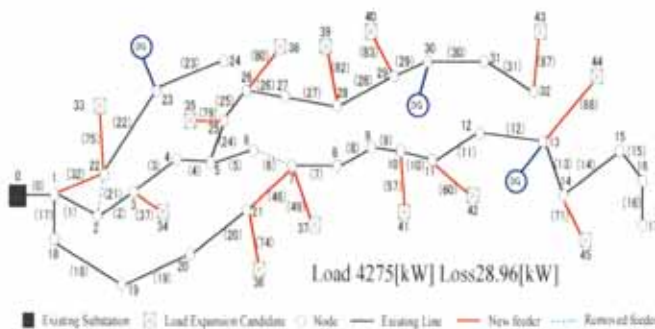


Fig.13. After the installation DG

Table.2 Position and power

install position	13	23	30
power[p.u]	0.0958	0.0981	0.0998

11. まとめ

本稿では、新規負荷や分散型電源の配電系統への連系を考慮した信頼性の高い新たな配電系統の構築を行う方法について提案した。結果として以下のことが明らかとなった。

- (1) 配電系統の放射状制約に対しては、ビットコーディングの代替として、常に設置される線路数が一定になるようなコーディングすることによって、探索性能の向上を図ることができた。
- (2) 多目的最適化手法によって得られる解は、通常パレート最適解集合であり、最終的な実行解の候補を持たない。そのため、本稿では新たに θ -domination による解の抽出を提案することで、損失が 28.2%、コストが 53.3% 軽減できるような、目的関数相互にメリットのある解の抽出を実現できる良好な解を得た。
- (3) 再構築された系統に対し、今後、大量に連系されると予想される DG の逆流を抑制するような配置と出力を求めることで、既存系統と比較して、損失を約 78% の軽減を実現することができた。

今後は、問題規模の拡大や制御手順について検討する予定である。

文 献

- (1) 山田佳法・森啓之：「多目的配電系統拡張計画に対する Controlled Elitist NSGA の適用」, 電気学会研究会資料, PE, 電力技術研究会, Vol. 2006, No. 33 pp. 29-34 (2006)
- (2) 西川禎一・三宮信夫・茨木俊秀：「最適化」, 岩波講座情報科学 19 第 4 章, 岩波書店 (1982)
- (3) 稲垣潤・中島純・長谷山美紀・北島秀夫：「配電系統事故復旧問題の遺伝的アルゴリズムを用いた多目的最適化に基づく解法」, 電学論 B 電力エネルギー部門誌, Vol. 124, No. 3 pp. 404-412 (2004)
- (4) 渡辺真也・廣安知之・三木光範：「遺伝的アルゴリズムを用いた多目的最適化へのアプローチ」, 日本機械学会誌, Vol. 106, No. 1011 P. 121 (2003)
- (5) 廣安知之・三木光範・渡辺真也・迫田岳志・上浦二郎：「多目的遺伝的アルゴリズムにおける各手法の比較」, 同志社大学理工学研究報告, 第 43 巻, 第 1 号, pp. 41-52 (2002)
- (6) 勝又勇治・倉橋節也・寺野隆雄：「タブーリストを用いたベジアン最適化アルゴリズムによる多峰性関数最適化」, 情報処理学会誌 数理モデル化と応用, Vol. 43, No. SIG10(TOM7), pp. 14-23 (2002)
- (7) 岩崎敬亮・青木秀憲：「PSO を用いた多目的最適化手法による電圧無効電力制御」, 東海大学紀要工学部, Vol. 47, No. 2 pp. 49-54 (2007)
- (8) 林泰弘・高野浩貴・松木純也・西川裕士：「パレート最適解を用いた配電ネットワーク構築の多目的最適化手法」, 電学論 B 電力エネルギー部門誌, Vol. 128, No. 10 pp. 1208-1215 (2006)
- (9) K. Deb and T. Goble: "Controlled Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Better Convergence" Proceeding of the First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, pp. 42-50 (2001)
- (10) Tomoyuki Hiroyasu, Masashi Nishioka and Mitsunori Miki "Discussion on Distributed Cooperative Scheme for Multiobjective Genetic Algorithm", The Science and engineering review of doushisha university, Vol. 48, No. 3 pp. 43-54 (2007)