東海大学紀要工学部
vol.53,No1,2013,pp.13-20

多目的最適化手法による負荷変動を考慮した電圧・無効電力制御

奥脇　祐貴[*1]　青木　秀憲[*2]

Voltage and Reactive Power Control Using Multi-Objective Optimization with Load Changes

by

Yuki OKUWAKI[*1] and Hidenori AOKI[*2]

(Received on March 27, 2013 and accepted on July 11, 2013)

Abstract

Recently, circumstances surrounding power systems have changed significantly. In this paper, the voltage and reactive power control (VQC) of a system with load changes using a multi-objective optimization method is proposed. In this research, the simulation was carried out by using an excellent multi-objective optimization GA known as the Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA2).

Keywords: Voltage and Reactive Power Control (VQC), Load Changes, Multi-Objective Optimization, NSGA2

1. はじめに

近年，電力系統は電力需要の増大に伴い電源の偏在・巨大化している。また、電力自由化により IPP（独立系発電事業者）・PPS（特定規模電気事業者）の参入，分散型電源の連系など電力系統には新たなものが導入されることから，系統は一層複雑化することになる。これらに対しても電力系統では，これまで以上に高信頼かつ安定した系統制御が求められるものと思われる。このような状況下においても，効率的な系統運用を実現するためには電圧調整用機器や調相設備等の系統設備を用いて，系統内の電圧制定性や発電機無効電力などの制約を満足しながら，送電損失の低減，系統電圧の維持，制御余裕の3つを考慮した電圧・無効電力制御（Voltage and Reactive Power Control :VQC）がさらに重要になってくるものと考える。これまで VQC 問題に対しての多くの研究報告がされ，近年では多目的最適化手法[1]を用いた研究が進められている。多目的最適化手法とは，評価関数に対して従来からある単一目的の最適化[2][3][4]とは異なり，トレードオフの関係をもつ複数の評価関数に対して検討したものである。そのため，パレート最適解の概念を利用し，それぞれの評価関数の持つ相対的な妥協解が得られることになる。これらパレート最適解の集合から最終的な解の選択（実行解）を意思決定者に解集合の中から決定してもらうことにより多目的問題に対処したものである。本論文では，このパレート最適解における解集合の効果を検討するために NSGA2（Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm）という多目的最適化手法を電圧・無効電力制御に適用し，この手法の有用性について研究を進めている。

これまでの研究では，評価関数にある送電損失などを解析するための潮流計算は，非線形混合整数問題となるため収束しないなどの理由から，ある任意の時間帯のみについて報告されているのが実情である。しかしながら，電力需給は日負荷曲線によって表現され，時々刻々と変動し，それに伴い電圧も変動することになる。これらは季節や天候によっても影響を受けることから電力系統の運用において重要なデータとして取り扱われている。そのため，実際の系統運用では日負荷変動の変化にも対応した系統制御を行わなければならない状況となっている。

本論文は，上記の事柄を検討するために 1 年を通してある日本の四季に相当する負荷変動を考慮し，3 項目の評価関数に対して多目的最適化手法で最も効果的な手法とされている NSGA2 を適用し，VQC 問題に対するその効果を検討したもので，それらの結果について報告する。

2. 電圧・無効電力制御

電力系統の電圧は，需要と供給力の変化により，時々刻々と変化することになる。このように変化する系統電圧に対して，電圧安定性の維持，機器から見た適正電圧の維持，送電損失の低減等の観点から発電機無効電力，変圧器タップ，調相設備等を制御して系統の電圧を適切に制御することを電圧・無効電力制御と言われている。

2.1　制御変数と制約条件

電力系統は運用状況，負荷の変化に応じた電圧無効電力制御による適正電圧の維持が図られている。本研究で取り扱う制御変数は，電力用コンデンサ（Static Capacitor :SC），分路リアクトル（Shunt Reactor :ShR），

*1　工学研究科電気電子システム工学専攻修士課程
*2　工学部電気電子工学科教授

負荷時タップ切替変圧器（Load Ration Control Transformer :LRT），発電機送電端端子電圧（VG），発電機無効電力出力（QG）とする。これらの制御変数を次のようなベクトル式で定義する。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x} &= [SC, ShR, LT, V_G, Q_G]^T \\ &= [SC_1, \cdots SC_a, \cdots SC_{N_C}, ShR_1, \cdots ShR_b, \cdots ShR_{N_S}, \\ &\quad LT_1, \cdots LT_c, \cdots LT_{N_{LT}}, V_{G,1}, \cdots V_{G,d}, \cdots V_{G,N_G}, \\ &\quad Q_{G,1}, \cdots Q_{G,e}, \cdots Q_{G,N_G}]^T \end{aligned} \quad \cdots(1)$$

ここで，SCa：電力用コンデンサ a のバンク投入数，NC：電力用コンデンサ設置台数，ShRb：分路リアクトル b のバンク投入数，Ns：分路リアクトルの設置台数，LTc：負荷時タップ切替変圧器のタップ位置，NL：負荷時タップ切替変圧器の設置台数，$V_{G,d}$：発電機 d の送電端端子電圧，$Q_{G,e}$：発電機 e の無効電力出力，NG:発電機数を示す。

電圧無効電力制御では離散化されたこれら制御変数をそれぞれの上下値範囲内で変化させ，最適な制御変数の制御量を求める組み合わせ最適化問題となる。

そこで，各制御量の上下限値を MIN と MAX とし，次のように設定する。

$$SC_{MIN} \le SC \le SC_{MAX} \quad \cdots(2)$$
$$ShR_{MIN} \le ShR \le ShR_{MAX} \quad \cdots(3)$$
$$LT_{MIN} \le LT \le LT_{MAX} \quad \cdots(4)$$
$$V_{G,MIN} \le V_G \le V_{G,MAX} \quad \cdots(5)$$
$$Q_{G,MIN} \le Q_G \le Q_{G,MAX} \quad \cdots(6)$$

また，このときの系統運用上の制約条件は，母線電圧制約，発電機の無効電力制約，有効電力の需給バランス制約の 3 つとし，各制約条件を次のように設定する。

$$V_{N,MIN} \le V_N \le V_{N,MAX} \quad \cdots(8)$$
$$Q_{G,MIN} \le Q_G \le Q_{G,MAX} \quad \cdots(9)$$
$$\Delta P_{L,MIN} \le \Delta P_L \le \Delta P_{L,MAX} \quad \cdots(10)$$

$V_{N,MIN}, V_{N,MAX}$：電圧上下限値，$Q_{G,MIN}, Q_{G,MAX}$：発電機無効電力上下限値，$\Delta P_{L,MIN}, \Delta P_{L,MAX}$：需給バランス上下限値

2.2 評価関数

本研究では，制約を考慮した送電損失率，電圧偏差率，電圧調整設備の使用率の 3 つを評価関数とし，NSGA2 による 3 目的の評価の最小化を実施している。各評価関数を以下に示す。

$$f_1 = W_{DE}\left\{\sum_{n=1}^{N_N}(v_{n,DE})^2 + \sum_{e=1}^{N_G}(q_{e,DE})^2 + (\Delta p_{L,DE})^2\right\} + p_{TLF} \quad \cdots(11)$$

$$f_2 = W_{DE}\left\{\sum_{n=1}^{N_N}(v_{n,DE})^2 + \sum_{e=1}^{N_G}(q_{e,DE})^2 + (\Delta p_{L,DE})^2\right\} + v_{DEF} \quad \cdots(12)$$

$$f_3 = W_{DE}\left\{\sum_{n=1}^{N_N}(v_{n,DE})^2 + \sum_{e=1}^{N_G}(q_{e,DE})^2 + (\Delta p_{L,DE})^2\right\} + u_{VRE} \quad \cdots(13)$$

W_{DE}：制約逸脱時の重み係数，$v_{n,DE}$：母線nの電圧制約逸脱量，$q_{e,DE}$：発電機eの発電機無効電力制約逸脱量，$\Delta p_{L,DE}$：有効電力の需給バランス制約逸脱量，N_N：母線数，N_G：発電機数，p_{TLF}：送電損失率，v_{DEF}：電圧偏差率，u_{VRE}：電圧調整設備の使用率

ここで，(11)～(13)式の第 4 項を以下のように算出する。なお，m_v は電圧調整設備の操作量である。

$$p_{TLF} = \frac{\sum_{j=1}^{N_N} p_{j,loss}}{\sum_{e=1}^{N_G} P_{G,e}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_N} p_{j,loss}}{\sum_{j=1}^{N_N} p_{j,loss} + \sum_{i=1}^{N_L} L_i} \times 100[\%] \quad \cdots(14)$$

$$v_{DEF} = \frac{\sum_{n=1}^{N_N} |V_{REF} - v_n|}{N_N} \times 100[\%] \quad \cdots(15)$$

$$u_{VRE} = \frac{m_V}{m_{V,MAX}} \times 100[\%] \quad \cdots(16)$$

$$m_V = \sum_{a=1}^{N_{SC}} SC_a + \sum_{b=1}^{N_{ShR}} ShR_b + \sum_{c=1}^{N_{LT}} |LT_{REF} - LT_c| + \sum_{e=1}^{N_G} |Q_{G,e}| \quad \cdots(17)$$

$p_{j,loss}$：j番母線の送電損失，$P_{G,e}$：e番発電所の有効電力出力，L_i：i番負荷の消費電力，N_L：電力系統内の負荷の数，v_n：n番母線の電圧，V_{REF}：基準電圧，m_v：操作量，$m_{V,MAX}$：操作量の上限値，N_{SC}：電力用コンデンサの設備台数，SC_a：電力用コンデンサaの投入量，N_{ShR}：分路リアクトルの設備台数，ShR_b：分路リアクトルbの投入量，N_{LT}:負荷時タップ切替変圧器の設備台数，LT_{REF}：負荷時タップ切替変圧器の基準タップ位置，LT_C：負荷時タップ切替変圧器の投入量，$Q_{G,e}$：発電機eの無効電力出力

(11)～(13)式の中括弧内にある第 1～3 項は，制約逸脱を表す項であり，健全時は常に 0 となる。重み係数 W_{DE} は制約逸脱した値を大きく表現するために乗じている。また，(14)～(16)式のように%表示することで，異なる条件下での制御結果を比較し易いようにしている。

3. 多目的最適化手法

多目的最適化問題では，解の決定者ごとに重視する目的が異なることや目的間のトレードオフの関係，また目的が複数存在する時，その解も複数存在するといったことを考慮しなければならない。そこですべての解から抽出でき，決定者を満足させるためには解集合の導出を行うことが最も合理的な解法の一つであるとされている。本研究では，この探索を多目的最適化手法を用いて実現を図っている。そのため，負荷変動を考慮した電圧・無効電力制御問題に NSGA2 を適用し，検討している。

3.1 多目的最適化

一般的に，最適化とはある評価（目的）関数に対して最適化を行う単一目的の最適化を指す。しかし，実際の工学問題等の様々な問題に対する最適化を考えた場合，単一の基準に基づくものではなく，複数の評価基準を同時に考慮しなければならない場合がある。このような複数の評価基準を持っており，これらの基準を同時に考慮しな

がら最適解の探索を行う問題を多目的最適化問題として定義づけられている。

3.2　多目的最適化問題

多くの多目的最適化問題では，評価の基準がそれぞれトレードオフの関係を持っている場合が多い。トレードオフの関係とは，一つの基準に対して最適化を行うことで利益を得ようとしたとき，その他の基準に対しては利益が得られなくなる関係である。したがって多目的最適化問題では，複数の評価基準に対して，単一目的の最適解を得ることは難しい。そのため，多目的最適化ではパレート最適解という別の概念を用いて探索を行うことになる。

多目的最適化問題は「複数個の互いに競合する評価（目的）関数を与えられた制約条件の中で何らかの意味で最小化（最大化）する問題」と定義されている。評価関数が互いに競合しあっているため，全ての評価関数の値が最良であるような最適解を求めることはできない。そのため，多目的最適化では，ある評価関数の値を改善するためには，少なくとも他の一つの評価関数値を改悪せざるを得ないような解を求めることになる。多目的最適化では，このような解をパレート最適解（Pareto-optimal solution）と呼んでいる。

3.3　パレート最適解

多目的最適化問題では，他の解に劣らないことが保証されたパレート最適解を求めることが合理的とされている。パレート最適解は解の優越関係により定義されている。解の優越関係の定義は以下のように示されている。

２つの解 $x^1, x^2 \in R^{Nf}$ とする。ここで，解 x は，$x=(x_1, x_2, \ldots, x_{Nf})$ の Nf 次元ベクトルである。この時，解の優越関係は次のように定義される

1) $f_i(x^1) \leqq fi(x^2)$　$(^{\forall}i=1,\ldots,j)$ の時，x^1 は x^2 に優越する。

2) $f_i(x^1) < fi(x^2)$　$(^{\exists}i=1,\ldots,j)$ の時，x^1 は x^2 に強い意味で優越する。

ただし，j は目的（評価）関数の数を表している。

上記に示される定義より，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。次にこの優越関係に基づくパレート最適解の定義を次に示す。

$x^0 \in R^{Nf}$ とした時

・x^0 に強い意味で優越する解 $x \in R^{Nf}$ が存在しない時，x^0 を弱パレート最適解となる。

・x^0 に優越する解 $x \in R^{Nf}$ が存在しない時，$x0$ を（強）パレート最適解となる。

多目的最適化に対する最適解とは，１つの解のみを指すのではなく，パレート最適解の集合として求めることになる。パレート最適解の集合が形成する面のことをパレート最適フロントと呼ばれている。例えば，Fig.1 は２目的の最小化問題のパレート最適解の概念図を示したものである。黒丸印がパレート最適解を示しており，白丸印が弱パレート最適解(劣解)となっており，白丸よりも黒丸が優越しており，良好な解となる。また，図に示すようにパレート最適解は一般に複数個存在し，どの解を選択するかをどのように運用するかによって意志決定者が判断することになる。

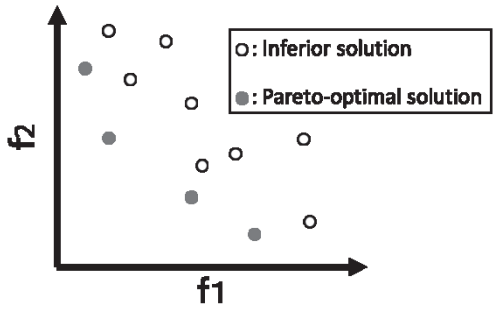


Fig.1 Pareto-optimal solution

3.4　NSGA2（Elitist Non-Dominated Sorting GA）

NSGA2 は，Ded 氏ら[5]によって開発された多目的最適化手法である。主な特徴は高速非優越ソート，エリート主義，混雑度距離といった 3 つの要素が導入されている。NSGA2 では，高速非優越ソートによってランク付けが高速化され，エリート主義により優良解の保存がなされる。また，混雑度距離の導入によってニッチングパラメータが不要となっている。これらにより，効率的な個体の取捨選択が実現されており，多目的最適化問題に対して，高い性能を示すことが知られている。Fig.2 は，高速非優越ソートの概念図を示したものである。各個体の支配個体と被支配個体を同時カウントすることにより Goldberg のパレートランキングのランク付けを高速化するための様子を表したものである。

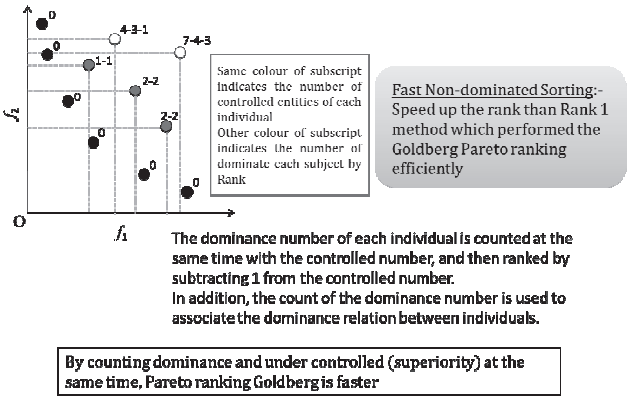


Fig.2 Fast Non-Dominated Sorting

Fig.3 は，エリート主義による概念図を示したものである。通常の GA のエリート保存と同様に適応度の高い個体群(上位ランク)を残すが，違いは後述する混雑距離によって同一ランクの取捨を判定する様子を表している。Fig.4 は，混雑度距離の概念図を示したものである。混雑度距離とは，各個体の疎密を表すものであり，小さな値ほど密である。この値が小さい個体は他の個体に隣接しており，独自性は低い個体となる。反対に大きい個体は，疎であり独自性が高い個体となる。これによりエリート主義の工程で混雑度距離の小さい個体を削除することは，解の多様性の確保（ニッチング）に効果的なものとなる。なお，実際の混雑度距離 d_p は隣接している 2 個体に対して，図中にある式により算出されることになる。

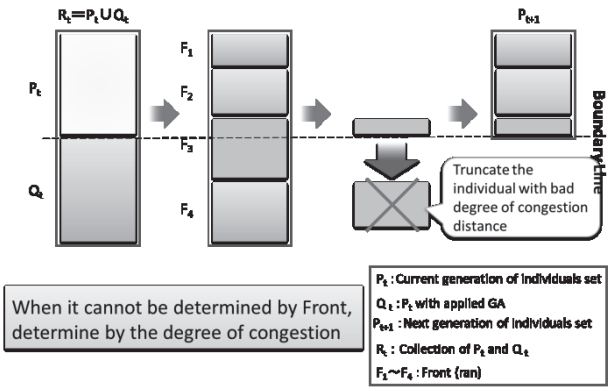


Fig.3 Elitism

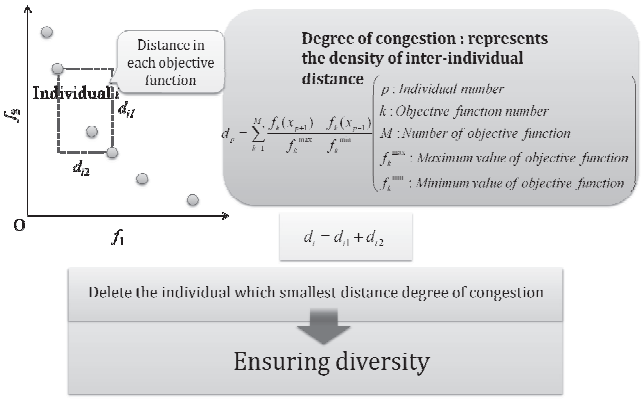


Fig.4 Congestion level distance

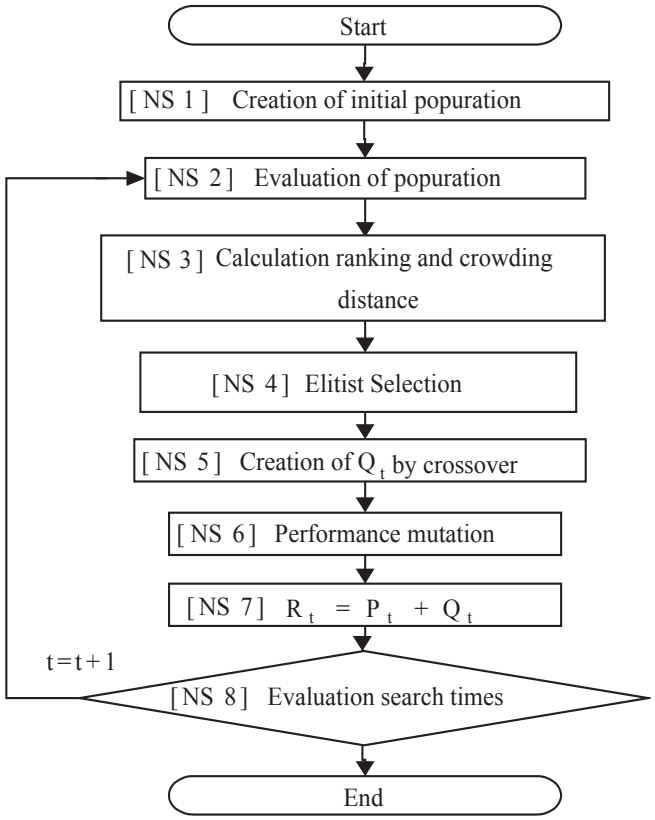


Fig.5 Flow chart of NSGA2

Fig.5 は，それらを用いたフローチャートであり，最後にそのアルゴリズムの詳細を記述している。

[NS1]:$R_t(=P_t+Q_t)$個の個体をランダムに生成する。

[NS2]:生成された個体を評価し，評価値を与える。

[NS3]:与えられた評価値に対して，高速非優越ソートにより各個体にランキングを与える。そして，各個体に対してはシェアリングの代用となる混雑度 d_p を算出する。d_p は，ランキング i (Rank1,2,3･･･)の個体に着目し，1 つ目の評価項目（$f_1(x)$）に対する適応度（評価関数の値）を求め，これを順にソートして算出することになる。

これを評価関数となる評価項目数だけ繰り返すことによって，各個体の d_p が決定されることになる。d_p が大きいほど周囲に類似した個体が存在していないため，重要な解であり，これを選択時に反映させることで同一ランク内での解の多様性を保持することが可能となる。

[NS4]:個体をランキング順にソートする。ランキングの小さい個体から順(F_1,F_2･･)に親個体 P_{t+1} に保存する。この時，P_{t+1} の保存サイズ以下の個体は淘汰されることになる。

[NS5]:P_{t+1} に保存された個体に対して，乱数によって親個体を選択し，これらの交叉・突然変異からなる個体をトーナメント戦略により子個体 Q_{t+1} を生成する。

トーナメントの評価基準は次のように定義される。ランダムに選ばれた個体に対して，まず個体のランクについて比較する。次に，選択された個体が同一ランクの場合には d_p の比較を行い，より優れている個体を選出する。

[NS6]:選出した個体に対して突然変異を実行する。

[NS7]:P_{t+1} と Q_{t+1} を合わせて R_{t+1} とする。

[NS8]:終了条件を満足するまで[NS2]～[NS7]を繰り返す。

3.5 解集合の評価方法

解集合の評価事項には，主に解の多様性に重みが置かれる。具体的にはそれを含めた以下の 2 点で評価を行うことになる。

(a)解の均一な分布（分散）

(b)解の幅広さ

これらを評価する手法として，解の分散の度合いを表す被覆率(Cover Rate)と解の幅の比率が提案されている。

本論文では解の幅の比率と被覆率を算出し，解集合の多様性の評価が実施されている。

3.5.1 解の幅の比率

各目的関数の最大値と最小値の差は選択肢の幅広さに示している。本論文では大小異なる各目的関数を比率で表現することで統一的に解の幅の評価を行っている。ある目的関数の解の幅の比率を$W_{k,ration}$，ある目的関数の最大値と最小値を$f_{k,max}$，$f_{k,min}$として以下に式を示す。

$$W_{k,ration} = \frac{f_{k,min}}{f_{k,max}} \quad \cdots(18)$$

3.5.2 被覆率

パレート最適解を探索する際，解の個体群が 1 点に集中していては良い解集合と言えない。そのため，何らか

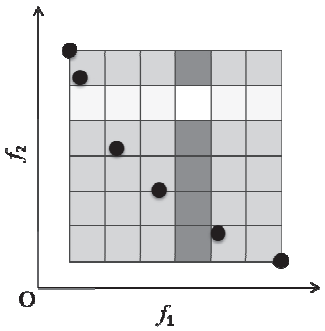
の解の幅広い分布に関する指標が必要となる。その指標が被覆率である。被覆率(記号：Icover)は，得られたパレート最適解に対する絶対的な評価手法であり，パレート最適フロントに対する幅広さ,隙間の間隔の評価を行う。本論文では以下のような方法を用いている。

まず，各目的関数に対する最大値と最小値を探索し，その間をあらかじめ決めておいた分割数で分割する。それぞれに分割された領域をどれだけカバーしているかを評価値として採用する。適用した式を以下に示している。ある目的関数 f_k に対する被覆率 Icover,k は，次式となる

$$I_{\mathrm{cover,k}} = \frac{N_k}{N} \qquad \cdots(19)$$

なお，上式における N は分割数，N_k パレート最適解が存在する小領域における被覆数(個数)を示している。また，パレート最適解集合の被覆率 Icover は各目的関数における被覆率 Icover,k の平均によって求められる。具体的な式は M を目的関数の数とすると以下のようになる。

$$I_{\mathrm{cover}} = \frac{1}{M}\sum_{k=1}^{M} I_{\mathrm{cover},k} \qquad \cdots(20)$$



$$I_{\mathrm{cover}} = \frac{1}{2}\left(\frac{5}{6}+\frac{5}{6}\right) = \frac{10}{24} = 0.4166\ldots \cong 0.42$$

Fig.6 Cover rate

Fig.6 は，(20)式により求められる被覆率の簡単な概念図を示したものである。したがって，被覆率の最大値は 1，最小値は 0 となり被覆率が最大値の 1 に近いとき，全ての領域に解が存在していることになり，解が集中することなく全体に分布していることになり，良好な解が算出されることになる。なお本論文では分割数を 100 として計算している。また，後述に示す 4.2 シミュレーション結果の検討では被覆率の値（Table 3，Table 4）を(20)式に 100 を掛け，%で表示している。

4. シミュレーション

4.1 シミュレーション条件

本研究では，東京電力の過去の電力使用実績データ 2009 年・2010 年の日負荷変動を基に作成した Fig.7, Fig.8 のような日負荷変動（ただし，各負荷の力率一定）に対して NSGA2 による VQC を実施している。その際，各年を四季により区分し，各季節における最大使用電力量から，1 年を通した負荷変動について検討している。季節の区分は気象庁によるデータを参照している。(春：3～5 月，夏：6～8 月，秋：9～11，冬：12～2 月) なお，日負荷曲線を考慮する際に，負荷量により供給力を変動させる系統制御を行うため，各季節の時刻毎の供給力を調整する際には,発電機の起動停止が実施されることになる。

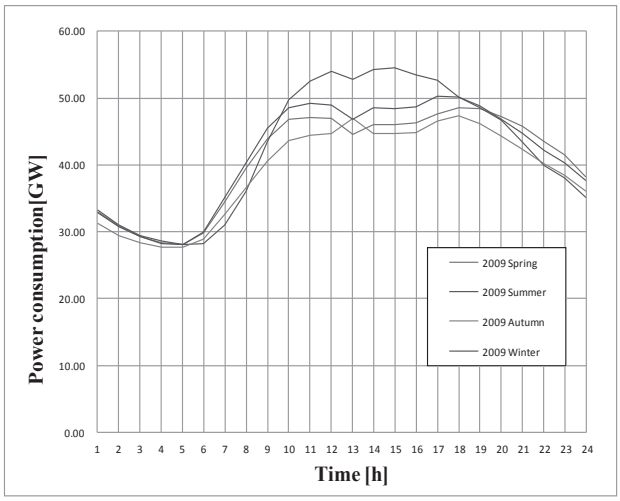


Fig.7 Daily load curve of each season of 2009

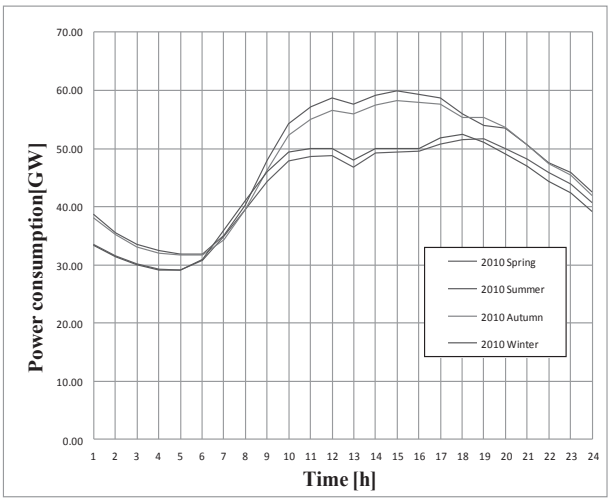


Fig.8 Daily load curve of each season of 2010

Fig.9 は，これを適用した 15 母線系統モデルである。この系統には計 22 個の制御変数｛*SC* (6:母線 6，8，9，10，11，13)，ShR(6:母線 6，8，9，10，11，13)，LT(6:母線 1，2，3，4，7，12)，Vg(4:母線 1，2，3，4)｝が配置されている。初期運転状態では SC 容量が動作していないものとし，ShR と Vg（送電端端子電圧）の位置はそれぞれ中間値にあり，この状態から系統が運用され，LT のタップ位置などのパラメータが探索されることになる。表 1 は本系統モデルにおける運用範囲を示したものである。このような条件の基で，負荷変動を考慮した電圧・無効電力制御に対して,多目的最適化手法である NSGA2 を適用し，その効果や本手法の有用性について検討している。表 2 は，本手法に用いた設定パラメータ値を示している。

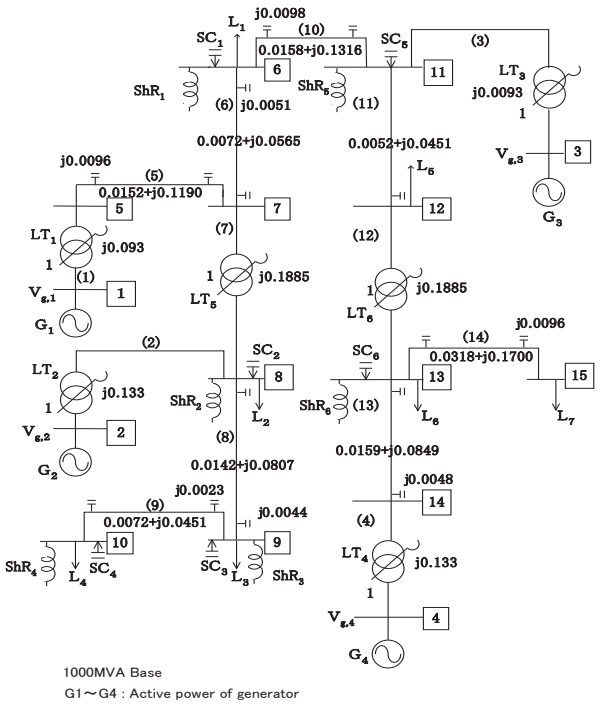


Fig.9 15 node power system model

Table.1 Details of model system

Restriction of V_{MIN} and V_{MAX} limit			
V_{MIN}	0.9	V_{MAX}	1.1
Controlled parameter			
Controller	Initial statement	Range of controller	
SC	0.00	$0.00 \leqq SC_a \leqq 0.60$	
ShR	0.00	$0.00 \leqq ShR_b \leqq 0.40$	
LT	1.00	$0.90 \leqq LT_c \leqq 1.10$	
Vg	1.00	$0.90 \leqq Vg_d \leqq 1.10$	

Table.2 Setting of parameter of NSGA2

P_t size	100
Q_t size	100
Selection	Tournament
Length of Parameter	25
Tournament size	2
Crossover rate	1
Crossover	2points
Mutation rate	1/Length
Numbers of calculation	100000

4.2　シミュレーション結果

Table 3，Table 4 は，2009 年，2010 年の時間帯（季節）ごとの各評価（目的）関数値の平均値を算出したものである。また，同時に解集合の多様性を示す被覆率と解の幅の比率についても記述している。いずれも 24 時間で平均した結果を示したものである。その際，評価の目安とするために参考値についても同時に記載している。これらの参考値（Reference value）は，電気事業連合[6]，参考文献[5], [7]または東京電力のホームページ[8]になどによって報告されているデータを基に作成した基準値である。例えば，Table 3，Table 4 に示すように送電損失率の平均値は日本の電力系統においては 5%未満というデータが報告されているので 5%と設定したものである。（参考文献[7]に記載）同様に，電圧偏差率についても各電圧と定格電圧との許容差は，±5%以下でなければならないことから，その絶対値となる 5%が設定されることになる。（参考文献[5]に記載）さらに設備使用率についても，充分な余裕を持たせるため 60%としている。さらに，NSGA2 による手法の評価基準となる解の幅の比率及び被覆率の参考値についても過去の研究データ等（例えば参考文献[1]）の参照から，設定した値となっている。これらの参考値を基にそれぞれの結果について検討することになる。

NSGA2 による Table 3，Table 4 の結果は，いずれの季節においても同様な傾向が示されていることがわかる。そのため，各項目における制御効果を参考値に基づいて検討する。まず送電損失率は参考値と比較した場合，いずれの年の季節においても損失率が参考値より軽減できていることがわかる。次に，電圧偏差率もいずれの季節においても参考値以下となっている。これらから良好な制御が実現できていることを確認することができる。同様に，設備使用率についても 60%以内の値に収まっていることから十分な制御が実現されていることが示されている。

結果として，NSGA2 による制御は，年ごとのいずれの季節においても系統の送電損失率・電圧偏差率・設備使用率を良好に制御でき，非常に高い制御効果が達成できていることがわかる。

Table.3 Results of simulation of 2009

	Calculated value				Reference value
	Spring	Summer	Autumn	Winter	
Transmission loss factor[%]	0.98	1.02	0.94	1.00	5.00
Voltage deviation factor[%]	1.59	1.59	1.60	1.57	5.00
Voltage regulating equipment utilization[%]	41.03	41.50	38.83	41.71	60.00
Width ratio of Average	0.41	0.41	0.40	0.40	0.50
Cover rate[%]	63.76	62.99	63.89	63.43	66.67

Table.4 Results of simulation of 2010

	Calculated value				Reference value
	Spring	Summer	Autumn	Winter	
Transmission loss factor[%]	1.03	1.15	1.13	1.04	5.00
Voltage deviation factor[%]	1.66	1.65	1.63	1.64	5.00
Voltage regulating equipment utilization[%]	42.32	45.74	44.60	42.76	60.00
Width ratio of Average	0.41	0.43	0.44	0.41	0.50
Cover rate[%]	63.62	63.40	63.56	63.33	66.67

さらに, NSGA2 による手法よって求められる解集合の多様性の評価基準となっている解の幅の比率及び被覆率の項目について検討する。解の幅の比率については，参考値である 0.5 以下となるときに良好な結果を示すことになる。年ごとのいずれの各季節においてもこの値以下となっていることから，解の幅は十分確保されているものと考える。一方，解集合の均一な分散を示す被覆率については，66.67 の参考値が設定されることになる。年ごとのいずれの季節においてもこの値よりも高い値を得ることができなかった。そのため，被覆率については良好な結果が得られなかったことになる。したがって，本手法となる NSGA2 による解析は評価（目的）関数にある各項目の値については良好な制御操作を実現できることが明らかとなった。しかしながら，解の多様性の評価の 1 つである被覆率については参考値よりも僅かに低い値となり満足のいく結果を得ることができなかった。今後は，この値を向上させるアルゴリズムの改良が必要になってくるものと思われる。

5. まとめ

本論文は，これまで報告されている任意の時間帯のみの負荷による解析ではなく，1 年間を通してある負荷変動を考慮し，これを季節ごとに分類して電圧・無効電力制御について検討したものである。これらの制御には多目的最適化手法の中で最も効果的な手法とされている NSGA2 を適用し, その有用性について検討したものである。結果として，2009 年，2010 年のいずれの季節においても系統に対して柔軟に系統制御が実現できることを明らかにすることができた。しかし，NSGA2 による解集合の多様性の評価基準となる被覆率については目標となる値を得ることができず，満足する結果を得ることができなかった。これからの電力系統の実状を考えた場合，今後電圧・無効電力制御問題では運用者によって目的の異なり，それらがトレードオフの関係にある制御が必要になってくると思われる。この観点からは多目的最適化手法が有効であり，本手法となる NSGA2 による解析は有用な結果を得ることができるものと考える。しかしながら，解の多様性の評価の 1 つである被覆率については良好な値とはならなかったので，今後は系統制御の精度を落とすことなく，解集合の多様性向上を目標にし，アルゴリズムの改良に取り組んで行く予定である。

参　考　文　献

[1]　廣安知之，三木光範，渡邉真也，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)

[2]　青木秀憲・水谷芳史,「制御手順を考慮した遺伝的アルゴリズムを用いる電圧無効電力制御」，電学論 B, Vol.119-B,　No.7pp757-764(1999-7)

[3]　岡倉秀行・青木秀憲,「メタヒューリスティックスによる運用余裕を考慮した電圧無効電力制御に関する研究」，東海大学紀要工学部，Vol.48，No.2pp11-16(2008)

[4]　岡倉秀行・青木秀憲,「電圧無効電力制御への多目的最適化手法の適用」，電学論 B，Vol.130-B，No.3pp320-329(2010-3)

[5]K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, No.2, April 2002, pp. 182-197.

[6] 電気事業連合会「電気事業のデータベース(INFOBASE)」http://www.fepc.or.jp/library/data/infobase/index.html (2010-12)

[7]Agency of Natural Resources and Energy, Outline of Electrical Power Supply and Demand:2001 Fiscal Year (2002)

[8]東京電力「東京電力ホームページ(でんき予報)」過去の電力使用実績データ，2009，2010 http://www.tepc.co.jp/index-j.html