制御手順を考慮した PSO による電圧無効電力制御

正員 青木 秀憲* 正員 水谷 芳史*

Voltage and Reactive Power Control by Particle Swarm Optimization Considering Control Process

Hidenori Aoki*, Member, Yoshibumi Mizutani*, Member

This paper presents a new approach to optimal voltage and reactive power control based on a particle swarm optimization (PSO). The proposed method switches one of controller by PSO and considers control times to the objective function. Therefore, this method can give the control process. The methods which give the control process have not been proposed in the algorithm of PSO. The effectiveness of the proposed method is demonstrated by practical 15-bus and 118-bus systems.

キーワード：PSO，電力損失，電圧無効電力制御，制御手順

Keywords: particle swarm optimization, power loss, voltage and reactive power control, control process

1. まえがき

電力系統は，電気エネルギー需要の増大と共に電源の偏在化，巨大・複雑化が増している。そのために，無効電力設備等によって制約条件を満足しながら電力損失を軽減し，より多くの電力を輸送するための制御手順を求める電圧無効電力制御（VQC）問題が重要な課題となっている。

無効電力の最適化問題において従来の最適化手法^{(1)～(7)}では，一般に解の初期値依存性や調相設備投入量の離散値などによって求解が複雑となり必ずしも満足した解が得られない，などの問題があった。これらの問題を解決するために，大規模系統において遺伝的アルゴリズム（GA）を適用した有効な解析手法⁽⁸⁾や，現在の個別 VQC では制御しきれない電圧変動に対し，隣接機器からの応援制御を行う研究⁽⁹⁾さらに，最適化された制御変数の一斉操作による機器操作直後の電圧変動を防ぐ対策として，線形計画法を用いた予測先行型電圧無効電力制御方式⁽¹⁰⁾が提案されている。

しかしながら，今後下位系統に多数導入される太陽光発電や燃料電池などの分散型電源等による系統の複雑化に対しても高信頼かつ安定な電力を供給する制御問題が将来予測される。このような，電力系統の運用状況，負荷の変化に応じて無効電力調整を図る制御目的には電力損失の低減，系統電圧や無効電力バランスの適性維持とともに機器操作

回数の低減が設けられている。そのためこれらを網羅した中央 VQC による制御が，益々その重要性を増し，制御手順を与えた制御により運用することになるであろう。

そこで，本論文はこのような問題に対処するために連続型問題から離散値型問題まで多くの組合せ最適化問題に適用されている particle swarm optimization (PSO)⁽¹¹⁾（以後，従来型 PSO と名付ける）とこの PSO に様々な改良を加えた既存手法^{(12)～(17)}に注目し，従来型 PSO やこれまで開発された PSO を基に制御手順を与えることができる改良型 PSO を開発し，全系統で評価して調整用設備機器 1 台ずつの制御がより効果的に実現できる，新しいアルゴリズムを構築した中央 VQC を提案する。

そして，本論文ではこれを用いた本手法を 15 母線系統や IEEE-118 母線系統に適用して，従来型と改良型 PSO を比較し，その特性を検討する。

2. 制御変数の表現と制約条件

一般に，電力系統の無効電力計画・制御問題における制御変数は，SC のバンク投入量，LRT のタップ位置および発電機端子電圧である。ここでは，これら制御変数を次式のようにベクトル X で定義する。

$$\begin{aligned} X &= \{SC, LT, Vg\} \\ &= \{SC_1, \dots, SC_d, \dots, SC_j, \\ &\quad LT_1, \dots, LT_e, \dots, LT_k, \\ &\quad Vg_1, \dots, Vg_f, \dots, Vg_l\} \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここで， SC_d ： d 番目の SC のバンク投入量， LT_e ：
 e 番目の LRT のタップ位置， Vg_f ： f 番目の発電

* 東海大学
〒259-1292 平塚市北金目 1117
Tokai University
1117, Kitakaname, Hiratsuka 259-1292

機の端子電圧, j : SC の設備台数, k : LRT の設備台数, l : 発電機の設備台数

そして, 制御変数の制御量は上下限値を次式とする。

$$SC_{dmin} \leq SC_d \leq SC_{dmax} \dots\dots\dots (2)$$

$$LT_{emin} \leq LT_e \leq LT_{emax} \dots\dots\dots (3)$$

$$V_{gfmin} \leq V_{gf} \leq V_{gfmax} \dots\dots\dots (4)$$

ここで, SC_{dmax} , SC_{dmin} : SC の上下限値,
 LT_{emax} , LT_{emin} : LRT の上下限値, V_{gfmax} ,
 V_{gfmin} : 発電機出力電圧の上下限値

電圧無効電力制御問題においては, (1) 式にある制御変数は現在状態 (初期状態) と最適状態 (最終状態) の間にある一定の間隔で制御するものと仮定し, 各制御間隔でその制御量を求め, 最終状態において最適状態に到達するような制御が図られる。各制御量は (2) 式から (4) 式に示すような上下限値により実行可能領域を作成し, この範囲で制御量を求めている。

そして, 本 PSO を使用する際, 制御変数の各制御量に対して, (2) 式から (4) 式の可変範囲内に存在する制御ステップ値を各々 2 進数のビット列で表記し, 各エージェントを発生させている。そのため, 制御変数にある連続量 (V_g) に対しても 2 進数として取り扱い, 全ての制御量を離散化により表現している。また, 実行すべき状態変数の値の数は, 対象制御機器 $\times$ 制御間隔数 (2 進数で用いるビット数により決定) によって設定している。

系統内の母線電圧 V_r と発電機無効電力 Q_g に対して, 本論文では, まず, 制約条件の満足する範囲を V_r と Q_g に対して各々次式のように定義する。

$$V_{rmin1} \leq V_r \leq V_{rmax1} \dots\dots\dots (5)$$

$$Q_{gmin1} \leq Q_g \leq Q_{gmax1} \dots\dots\dots (6)$$

ここで, V_{rmax1} , V_{rmin1} : V_r の上下限制約値,
 Q_{gmax1} , Q_{gmin1} : Q_g の上下限制約値

次に, 制約逸脱の範囲として V_r , Q_g のペナルティー領域を次式で定義し,

$$V_{rmax1} < V_r \leq V_{rmax2}, V_{rmin2} \leq V_r < V_{rmin1} \dots\dots\dots (7)$$

$$Q_{gmax1} < Q_g \leq Q_{gmax2}, Q_{gmin2} \leq Q_g < Q_{gmin1} \dots\dots\dots (8)$$

さらに, ペナルティー領域をも逸脱した領域として次のごとく定義する。

$$V_r > V_{rmax2}, V_r < V_{rmin2} \dots\dots\dots (9)$$

$$Q_g > Q_{gmax2}, Q_g < Q_{gmin2} \dots\dots\dots (10)$$

ここで, V_{rmax2} , V_{rmin2} : V_r ペナルティー領域の上下限値, Q_{gmax2} , Q_{gmin2} : Q_g ペナルティー領域の上下限値

3. 目的関数

一般に, 前章に基づき PSO では初期運転状態からエージェント I_i を発生させ, その評価を行う目的関数 $f_0(I_i)$ は, 系統内の母線電圧 V_r [pu] と発電機無効電力 Q_g [pu] に対する各制約逸脱量 ρ_{ri} [%] と q_{gi} [pu] および送配電系統の電力損失 p_i [pu] からなる, 次式に示す評価関数 J_i の逆数とする。

$$J_i = W_1 \Sigma(\rho_{ri})^2 + W_2 \Sigma(q_{gi})^2 + p_i \dots\dots\dots (11)$$

$$f_0(I_i) = 1/J_i \dots\dots\dots (12)$$

ここで, W_1 , W_2 は, V_r と Q_g の各制約逸脱に対する重み, i は現在取り扱っている i 番目のエージェントを意味する。

なお, ρ_{ri} , q_{gi} は制約条件に基づいて算出するが詳細については文献 (18) と同様であり, それらを参照していただきたい。

本論文では, 目的関数に電圧と発電機無効電力の制約逸脱, それに電力損失の 3 種を用い, 重み W_1 , W_2 により早期の制約逸脱の解消と制約逸脱のない状態での電力損失低減の評価を実現できるように定式化されている。

4. 改良型 PSO の概要

4.1 PSO の概要について ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ 従来型 PSO は, Swarm Intelligence という分野の 1 つで 1995 年に Kennedy と Eberhart によって開発された。この手法は簡易化した社会的なモデルのシミュレーションを通して考案され, 各エージェント単独の位置情報の最良値, 各個体単独の進行速度及び集団的に共有された全体の位置情報の最良値を各エージェントがそれぞれ勘案し, 大域最適解 (最良解) を得る手法である。

従来型 PSO は, 本来, 上述の位置情報パラメータの変更量は連続値として開発され, そのアルゴリズムは, すべてのパラメータの値を設定してからその評価を実施するように構成され単純で計算時間が短く, 多くのメモリを必要としないなどの利点があげられている。

これを求める一般的な PSO の基本式は, 現在の速度 V_i , 各エージェントのそれぞれの探索における目的関数のそれまでの最良値 ($pbest$), 各エージェントの $pbest$ のうち集団の中で最も最良なもの, つまり集団のそれまでの最良値 ($gbest$) さらに現在の位置 S_i によって次の各エージェントの速度を次式で更新する。

$$V_i^{k+1} = W_3 \times V_i^k + C_1 \times rand() \times (pbest_i - S_i^k) + C_2 \times rand() \times (gbest - S_i^k) \dots\dots (13)$$

ここで, 係数 C_1 , C_2 については文献等で推奨される $C_1 = C_2 = 2.0$ を用いる。 $rand()$: 0 ~ 1 までの一様乱数, $pbest_i$: エージェント i の $pbest$, S_i^k : エージェント i の探索 k 回目の探索点, $gbest$:

それまでの探索回数で集団の中で最も高い目的関数を示すエージェントの位置

また、エージェント速度に対する重み係数 W_3 については、文献 (12) に示されている次式の関数とする。

$$W_3 = W_{\max} - \frac{W_{\max} - W_{\min}}{\text{iter}_{\max}} \times \text{iter} \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 $W_{\max}$ 、 $W_{\min}$ については C_1 、 C_2 と同様に文献等で推奨される $W_{\max} = 0.9$ 、 $W_{\min} = 0.4$ を用いる。 iter ：現在の探索回数、 $\text{iter}_{\max}$ ：最大探索回数

上記の式を用いることにより各エージェントは、これまでの最良解および集団の最良解に近づくような速度が求められ、これにより各エージェントの次の探索点を以下の式のように変更させる。

$$S_i^{k+1} = S_i^k + V_i^{k+1} \dots\dots\dots (15)$$

このように、従来型 PSO は群の中の鳥（エージェント）が、これまでの自己経験と群から与えられる情報を基に行動し、餌を探索する過程を模擬した最適化手法である。

この PSO を改良した手法の 1 つに、従来型 PSO を連続型変数と離散値型変数を含む混合変数に用いて混合整数非線形最適化問題（Mixed Integer Nonlinear Optimization Problem: MINLP）に適用できるように拡張し、電力系統の給電所などにおける集中制御によって平常時の VQC を実現できる方式（電圧信頼度を考慮した PSO による VQC⁽¹³⁾）が提案されている。この手法は、PSO のアルゴリズムに連続型潮流計算（Continuation Power Flow: CPFLOW）による P-V カーブの作成と高速電圧想定事故解析手法（Look-Ahead 法）を用いた MW 余裕値評価により制御の選択を行う方式であり、実系統規模に適用され、高速に良質な解を生成できることが確認されている。

さらに、従来型 PSO のメカニズムに GA 等で利用される選択の概念を組み合わせた Hybrid PSO (HPSO)⁽¹⁴⁾ が提案されている。この手法は、現状の探索点に対し評価値（目的関数値）の悪いエージェントの探索点と速度を評価値の良いエージェントにリプレースする。この際、各エージェントのこれまで探索してきた最も評価の良い探索点（pbest）の情報は残す操作を導入し、評価の高い領域を集中的に探索し、より良い解を見つけることができるような探索メカニズムを構成している。この手法を用いて配電系統の状態推定や VQC 問題などへの適用がすでに文献 (15)～(17) で検討されている。

4.2 改良型 PSO について 電圧無効電力制御において既存手法に用いた PSO は、探索毎に有効であった探索点（pbest, gbest）を利用して、それ以降の各制御機器（制御変数）にある制御量の探索点を乱数を用いて設定し、その潮流計算を実施後、本論文によれば (12) 式にある目的関数値によりその評価が行われる。しかしながら、この手法は、全制御変数を一挙に最適になるよう、制御手順を無

視し、最適値だけを探索する、いわゆる最適化された値へ暗に遷移できることを想定した手法である。そのため、制御の途中において制約逸脱が発生する可能性がある。これに対して改良型 PSO は、従来型 PSO に新たな改良を加え制約逸脱の解消から電力損失軽減までの制御をより効果的に実現できるよう制御手順を与えた手法である。

改良型 PSO は、図 1 に基づくフローチャートで構成されており、本手法による VQC の計算アルゴリズムは、以下のような手順となる。

[手順 1] 初期データの読込を実施する。 SC_d 、 LT_e 、 V_{gf} の各可変範囲に存在する制御ステップ値が、例えば 16 であるとする、2 進数 4 ビットの列で初期状態にあるエージェントを表現する。

[手順 2] 初期状態のエージェントから次のエージェント

図 1 改良型 PSO の流れ図

Fig. 1. Flow chart of proposed method.

図 2 改良型 PSO による位置変更の概念図

Fig. 2. Concept of positional change by improvement type PSO.

に対して制御手順を考慮するためにまず、一様乱数を用いて 4 ビット列で表現された 1 個の制御変数を選択する。次にその制御変数のもつ可変範囲に対して乱数によりその制御ステップ値を与えて制御量を決定し、次のエージェントを構成する。この選択により、図 2 に示すようにその制御変数の選択位置を表す S_{Xi}^k とその制御量の選択位置を表す S_{Yi}^k を各々表現する。そしてこのエージェントに対して $f_0(I_i)$ を計算し、 V_r と Q_g のペナルティー領域までの制約を満足するとき、新たなエージェントとして採用し、このときの S_{Xi}^k と S_{Yi}^k を保存する。これをエージェントの数だけ繰り返す。さらにこのとき採用するエージェントの数だけ初期速度 V_{Xi}^k, V_{Yi}^k をランダムに生成する。

[手順 3] そして、その状態にある X 軸, Y 軸にある位置情報を pbest とする。また、全てのエージェントの中で最も $f_0(I_i)$ の大きい位置情報を gbest として各々保存する。

[手順 4] 生成された各エージェントを (12) 式の $f_0(I_i)$ の大きい順に並べる。そのエージェントに対してその下位を任意の割合で最も $f_0(I_i)$ の高いエージェントのもつ速度 (V_{Xi}^k, V_{Yi}^k) と位置 (S_{Xi}^k, S_{Yi}^k) の情報に置き換える。これが実行された下位のエージェントを探索エージェントと名付け、以後これを用いる。この際、リプレイスされたエージェントは最も評価の高いエージェントのもつ位置情報の $gbest = pbest$ となる。

上述により、図 3 に示すようにリプレイスされたエージェントは gbest の位置から探索を実行することになる。この方法は、HPSO にある各エージェントのこれまで探索してきた最も評価の良い探索点 (pbest) の情報は残す操作と異

なり、有効な領域への探索の集中のみを考慮したものである。

また、遺伝的アルゴリズムの突然変異にあるエリート保存戦略を採用し、探索点において最初に生成されるエージェントは前の探索点で最も高い評価をもつ位置情報を保持する。

[手順 5] 各エージェントの次の探索点に対して制御手順を考慮するためにまず、探索回数毎に選択される制御変数 (制御機器) は (13) 式, (15) 式により V_{Xi}^{k+1} と S_{Xi}^{k+1} で選択し、次に、その制御量についても同様に (13) 式, (15) 式により V_{Yi}^{k+1} と S_{Yi}^{k+1} で選択する。そして、図 2 のように 1 つ更新された制御変数とその制御量に対して $f_0(I_i)$ を評価し、 V_r と Q_g の制約を満足するとき、新たなエージェントとして採用し、その情報を保存する。なお、このとき S_{Xi}^{k+1} と S_{Yi}^{k+1} の値が制御範囲内を逸脱した場合には、新たに乱数を用いて範囲内を選択、更新している。

[手順 6] 各エージェントに対して、新しい状態の評価値がこれまでの pbest より良好ならば、pbest を保存して更新する。また、現在の pbest の内、最も評価値の高いものが gbest より良好な値を示したならば、これを gbest として更新し、保存する。

[手順 7] 設定されたエージェント数を繰り返したならば手順 8 へ、そうでなければ手順 5 へ戻る。

[手順 8] 最大探索回数まで達したら探索を終了する。そうでなければ、手順 4 へ戻る。

5. シミュレーション結果と検討

本章では、従来型 PSO と提案している改良型 PSO を 15 母線系統と IEEE-118 母線系統に適用し、その特徴と効果を検討する。

5.1 15 母線系統への適用 図 4 は、7 つの負荷と制御変数として 6 台の SC, 6 台の LT, さらに 4 台の V_g からなる 15 母線系統モデルである。表 1 は、その運用条件で母線 8, 9, 10 の 3 ケ所で V_r が、発電機 G_1, G_2 の 2 ケ所で Q_g が制約逸脱を生じている変則状態を示している。

表 2 は、15 母線系統に対して総エージェント数を 20 とし、一様乱数の初期値 b と速度 V (最大, 最小) を変更して従来型 PSO により実施した結果である。ただし、 $W_1 = 100$, $W_2 = 50$, 探索回数 50 と設定して求めたものである。

従来型 PSO の結果は、速度の変化によって目的関数値に大きな差異を示さず、いずれも良好な値が得られていることがわかる。

図 5 は、従来型 PSO に対して探索エージェント数を 10 とし実施した制御手順を与えることができる改良型 PSO による結果を示している。図 5 に示した改良型 PSO による結果は、制約逸脱した母線から終了探索回数までに制御機器を 1 台ずつ順次制御し、制約逸脱の解消から制御の途

図 3 探索点の修正の概念

Fig. 3. Concept of modification of a searching point.

図 4 送電システムモデル

Fig. 4. Transmission system model.

表 1 運用条件

Table 1. Operational condition.

V_r : restriction of upper and lower limit value		V_r : upper and lower limit penalty value	
V_{rmin1}	0.90	V_{rmin2}	0.85
V_{rmax1}	1.10	V_{rmax2}	1.15
Range of generator reactive power limit value			
G_1	$-0.23 \leq Q_g \leq 0.40$	G_3	$-0.27 \leq Q_g \leq 0.50$
G_2	$-0.60 \leq Q_g \leq 1.50$	G_4	$-0.15 \leq Q_g \leq 0.37$
Upper and lower limit penalty value of Q_g		the values shown above $\times 1.1$	
Controller	Initial operating status	Variable region	
SC_d	0.0000	0.00 ~ 0.60	
LT_e	1.0066	0.90 ~ 1.10	
Vg_f	1.0066	0.90 ~ 1.10	
Load		L_4	0.504+j0.302
L_1	0.520+j0.285	L_5	0.015+j0.000
L_2	0.710+j0.258	L_6	0.135+j0.042
L_3	0.719+j0.384	L_7	0.525+j0.010

中で制約逸脱することなく電力損失の低減化が図られている。その時の $b = 1 \sim 5$ における平均目的関数値は 26.813 となり、最適性についても従来型 PSO と同程度の解が得られる良好な結果となり、効果的に制御を実施できることがわかる。なお、この改良型 PSO に対して 100 回乱数を変更して得られたその解の最大値は 27.318，最小値は 25.456，そしてその平均値は 26.593 となり、確率的最適化手法であ

表 2 従来型 PSO による計算結果

Table 2. Calculated value of conventional PSO.

b	max. 2		max. 3		max. 4		max. 5		max. 6	
	min. -2	min. -3	min. -4	min. -5	min. -6	min. -7	min. -8	min. -9	min. -10	min. -11
1	26.219	26.006	26.892	26.841	26.174					
2	26.826	26.678	27.113	27.117	26.671					
3	27.327	27.254	26.522	26.893	27.383					
4	26.610	27.430	27.121	27.157	27.007					
5	26.127	27.056	26.623	26.407	25.457					
M	26.622	26.885	26.854	26.883	26.538					

ここで、 V : 速度、 b : 一様乱数の初期値、 M : 初期値 b に対する目的関数の平均値

図 5 改良型 PSO を用いた目的関数値の推移

Fig. 5. Transition of objective function using improvement type PSO.

図 6 制御手順のみを考慮した PSO を用いた目的関数値の推移

Fig. 6. Transition of objective function by PSO considering only control process.

る PSO においても効果的な制御が実現できることがわかる。これに対して、本手法にある手順 4 の探索エージェントを考慮しない場合、すなわち PSO により制御手順のみを考慮して同様なシミュレーションを実行すると図 6 に示すように $b = 1 \sim 5$ における平均目的関数値は 24.732 しか得られなかった。この結果から、探索エージェントは、本手法において効果的であることがわかる。

本論文は、制約逸脱が発生している初期状態からシミュレーションを実行している。手順を考慮しない一般的な GA (SGA) によって得られた最適解によると初期の段階では制約逸脱を解消しにくいことをすでに文献 (18) において報告している。さらに、制約逸脱解消後から最終状態までの

途中の状態遷移においても制約逸脱が発生することを想定したものである。このような状況を、上述した SGA の計算により検証する。例えば、 $b = 3$ において得られた 15 世代から 16 世代の目的関数値 (24.870 → 25.198) の状態遷移のときに求められた各々の世代の最適値に基づいて無作為に制御変数の制御量を変更するときに制約逸脱が発生することになる。すなわち、同一時刻において制御機器を 1 台しか操作できないものとして仮に LT_5 を操作すると図 4 に示す母線 8, 10 において母線電圧の制約条件を逸脱する現象が生じることになる。このような事象はあまり起こらないと思われるが、確率的最適化手法により求められた制御変数の制御量が多く箇所でその値を変更する必要がある場合には、その制御の操作時にこのような状況を生じる可能性があるものと考えられる。

一方、効果的に機器設備を 1 台ずつ順次操作する、単純な従来手法の結果は、2 回の制御で制約逸脱を解消できるが 12 回の制御操作しかできず、目的関数値 25.315 と低い値に収束し、それ以上改善することができなくなる。この時の電力損失は 39.502 [MW] である。改良型 PSO による最適性は、図 5 によると、従来手法よりいずれも少ない制御回数で目的関数値を高くでき良好な結果となる。なお、このときの平均計算時間は約 1 分 30 秒である。なお、計算に使用した機種は NEC の EWS4800/320PX (クロック周波数: 100 MHz, 計算速度: 198 MIPS) である。

5.2 IEEE-118 母線系統への適用 IEEE-118 母線系統は制御変数である制御機器として 12 台の SC, 9 台の LT さらに 34 台の V_g からなる系統である。このときの運用条件は、表 3 に示す通りである。この系統で V_r が 5ヶ所、 Q_g が 1ヶ所、制約逸脱が生じている初期運転状態から終了探索回数まで従来型 PSO と改良型 PSO を適用し、比較したものである。

いずれの手法も W_1, W_2 値は前節と同様であり、総エージェント数 50, 探索回数 200 回として実施している。さらに探索回数の効果を確認するために改良型 PSO は、探索回数 300 回についても記述する。なお、従来型 PSO に用いた速度 V の値は表 2 に示したその最良値である ± 3 を適用し、総エージェント数に対して目的関数値の同じエージェントが 7 割以上存在したときを収束時の探索回数として記述している。また、改良型 PSO に適用する探索エージェント数は、25 に設定して実施したものである。

表 4 は、それらの結果を示したものであり、従来型 PSO によるといずれの b に対しても探索回数の途中において目的関数値に収束する傾向があることを示している。

一方、改良型 PSO の手法によると探索回数 200 回では、いずれの b に対しても途中で収束することなく従来型 PSO より良好な値になることがわかる。実行した探索回数 300 回においても 200 回と同様、良好な結果が得られている。

探索エージェントによる探索空間内の選択は、最も評価の高いエージェントを取り扱うため、より収束を強める機

表 3 運用条件

Table 3. Operational condition.

V_r : restriction of upper and lower limit value		V_r : upper and lower limit penalty value	
V_{rmin1}	0.95	V_{rmin2}	0.90
V_{rmax1}	1.05	V_{rmax2}	1.10
Range of upper and lower limit value of Q_g		Range of upper and lower limit penalty value of Q_g	
Setting values of each equipment		the values shown left $\times 1.1$	
Controller	Initial operating status	Variable region	
SC _d	0.0000	0.0 ~ setting values of each equipment	
LT _e	1.0066	0.90 ~ 1.10	
V_g _f	1.0033	0.95 ~ 1.05	

表 4 従来型 PSO と改良型 PSO による計算結果

Table 4. Calculated value using conventional PSO and improvement type PSO.

	Conventional PSO		Improvement type PSO			
	A= 50,ST=200		A=50,ST=200,S=25		A=50,ST=300,S=25	
b	OF	SC	OF	CT	OF	CT
1	0.8005	76	0.8135	108	0.8202	140
2	0.8028	70	0.8136	109	0.8199	152
3	0.7954	78	0.8089	100	0.8228	141
4	0.7747	77	0.8090	113	0.8189	133
5	0.7819	71	0.8004	105	0.8077	138
M	0.7911	74.4	0.8091	107	0.8179	144.2

ここで、A: 総エージェント数, ST: 探索回数, S: 探索エージェント数, OF: 目的関数, SC: 収束時の探索回数, CT: 制御回数

能が生じ、大域的最適解を探索する PSO の能力を損なってしまうものと予想されるが、図 6 で示したように本論文で設定するような探索エージェントを考慮しない PSO では、早期に収束性を強め、効果的な最適解を得ることができなかった。これを改善するために、本手法である制御手順を与える PSO の機能内に導入した探索エージェントによる選択は、他の探索点が最近探索した点と比較して相対的に有効である探索点に探索方向を向け直す機能となる。

また、制御手順を与える操作では、制御機器は 1 台しか切り換えられない制限があり、多くのパラメータからその最適位置を探索し、最適値をできるだけ探索回数毎に向上させるには探索エージェントが効果的な役割を果たしているものと考えられる。

さらに、最も高い評価をもつエージェントに対しては、エリート保存戦略を実行し、制御手順にある評価を下げることをしない機能を有している。これらの操作方法を加えることによって評価の高い領域を集中的に探索するメカニズムが追加され、適切な収束により良質な解を見つけだすことのできる探索メカニズムとなっている。

文 献

図 7 改良型 PSO による目的関数値の推移

Fig. 7. Transition of objective function using improvement type PSO.

図 7 は、表 4 にある探索回数 200 について $b = 1 \sim 5$ に対する制御回数 33 回までの改良型 PSO による目的関数値の推移を示したものである。 b の値によっては制約逸脱解消までに多くの制御手順を必要とするが平均制御回数は、12.4 回で達成でき、平均制御回数 107 回で良好な値となる。

なお、最も効果的なところから制御機器を 1 台ずつ順次操作する従来手法を制約逸脱解消まで適用すると、制御回数は 4 回で制約逸脱を解消できるが、計算時間には約 69 時間を費やす。そのときの目的関数による値は 0.7316 である⁽¹⁸⁾。これに対して改良型 PSO によれば、 $b = 1 \sim 5$ において最も早く制約逸脱を解消できるエージェントごとの平均制御回数は 9.2 回、計算時間は約 12.29 時間であり、そのときの目的関数による平均値は 0.7313 である。

これらの結果から、改良型 PSO による手法は、制約逸脱の解消から収束までの制御手順を求めることができ、大規模システムに適用できることがわかる。

6. ま と め

送配電システムの電圧無効電力制御問題が将来、全域を考慮した中央 VQC により実施されるものとして、PSO による手法を開発した。これは、同時刻において制御機器を 1 台ずつしか切り換えられないという条件の基に 15 母線システムと IEEE-118 母線システムに適用し、これに対しても制約逸脱が解消でき、任意の制御回数で電力損失を軽減できるような制御手順を図ったものである。その結果、改良型 PSO は、15 母線システムにおいては従来手法よりも少ない制御回数で目的関数値を高くすることができ、最適性についても従来型 PSO に匹敵する値を得ることができる。さらに、本論文の探索回数範囲内では大規模システムにおいて従来型 PSO にある探索回数の途中で生じる収束傾向が見られず、探索回数とともに改善し、良好な目的関数値を示すことがわかる。

今後は、制御回数や計算時間の軽減などの検討の必要性がある。これらの点を考慮して提案法を改良し、さらに実用的な手法としていく予定である。

(平成 15 年 3 月 27 日受付、平成 15 年 6 月 16 日再受付)

- (1) H.W. Dommel and W.F. Tinney: "Optimal Power Flow Solution", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, Vol.PAS-87, p.1866 (1968)
- (2) A.M. Sasson: "Nonlinear Programming Solution for Load-flow, Minimum-loss, and Economic Dispatching Problems", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, Vol.PAS-88, p.399 (1969)
- (3) K. Iba, H. Suzuki, K. Suzuki, and K. Suzuki: "Practical Reactive Power Allocation/planning Using Successive LP", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol.3, No.2, p.558 (1988)
- (4) 磯田八郎・大庭靖男:「2 次計画法を適用した最適潮流計算手法」, 電中研報, 178010 (1978)
- (5) K. Aoki and T. Fujikawa: "Var Planning and Non Convex Quadratic Programming", *T. IEE Japan*, Vol.100-B, No.6, pp.305-312 (1980-6) (in Japanese)
青木兼一・藤川隆文:「無効電力計画と非凸二次計画」, 電学論 B, 100, 6, pp.305-312 (1980-6)
- (6) S. Tamura, S. Iwamoto, and Y. Tamura: "Optimal Dispatching of Reactive Power in Power System Planning and Operation", *T. IEE Japan*, Vol.104-B, No.3, pp.173-179 (1984-3) (in Japanese)
田村 滋・岩本伸一・田村康男:「系統計画、運用における無効電力源の最適配分について」, 電学論 B, 104, 3, pp.173-179 (1984-3)
- (7) H. Sasaki, J. Kubokawa, and N. Yorino: "A study on Newton Optimal Power Flow for On-Line Application", *T. IEE Japan*, Vol.110-B, No.5, pp.413-419 (1990-5) (in Japanese)
佐々木博司・久保川淳司・餘利野直人:「ニュートン形最適潮流計算法のオンライン適用に関する一考察」, 電学論 B, 110, 5, pp.413-419 (1990-5)
- (8) K. Iba: "Reactive Power Planning in Large Power Systems using Genetic Algorithm", *T. IEE Japan*, Vol.113-B, No.8, pp.865-872 (1993-8) (in Japanese)
伊庭健二:「遺伝アルゴリズムに基づく無効電力最適計画」, 電学論 B, 113, 8, pp.865-872 (1993-8)
- (9) 林 修司・川田 明・林 重雄:「系統状態の変化に適應する自律分散型系統電圧・無効電力制御方式」, 電気学会電力技術研資, PE-94-69 (1994)
- (10) T. Isida, O. Kubo, C. Fukui, Y. Kokai, S. Mizutani, M. Yamamoto, and T. Takayama: "A Feasibility Study on Feed-forwarding Voltage Reactive Power Control Method Based on Linear Programming for Central Control Center", *T. IEE Japan*, Vol.117-B, No.8, pp.1115-1120 (1997-8) (in Japanese)
石田隆張・久保 理・福井千尋・小海 裕・水谷茂生・山本 誠・高山俊昭:「LP 法を用いた基幹系統への予測先行型電圧無効電力制御方式」, 電学論 B, 117, 8, pp.1115-1120 (1997-8)
- (11) J. Kennedy and R. Eberhart: "Particle Swarm Optimization", Proc. of IEEE the International Conference on Neural Networks, Vol.IV, pp.1942-1948, Perth, Australia (1995)
- (12) Y. Shi and R. Eberhart: "A Modified Particle Swarm Optimizer", Proc. of IEEE ICEC Conference, Anchorage (1998)
- (13) H. Yoshida, K. Kawata, Y. Fukuyama, S. Takayama, and Y. Nakanishi: "A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment", *T. IEE Japan*, Vol.119-B, No.12, pp.1462-1468 (1999-12) (in Japanese)
吉田裕宇・河田謙一・福山良和・高山信一・中西要裕:「電圧信頼度を考慮した Particle Swarm Optimization による電圧無効電力制御方式の検討」, 電学論 B, 119, 12, pp.1462-1468 (1999-12)
- (14) P. Angeline: "Using Selection to Improve Particle Swarm Optimization", Proc. of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Anchorage (1998-5)
- (15) S. Naka, S. Toune, T. Genji, T. Yura, Y. Fukuyama, and S. Takayama: "Distribution State Estimation Considering Partical Equipment in Distribution Systems", *T. IEE Japan*, Vol.120-B, No.12, pp.1566-1572 (2000-12) (in Japanese)
仲 成規・藤根 栄・元治 崇・由良俊樹・福山良和・高山信一:「実系統機器の特性を考慮した配電系統状態推定方式の検討」, 電学論 B, 120, 12, pp.1566-1572 (2000-12)
- (16) 福山良和:「電力系統の電圧・無効電力制御への PSO の適用比較検討」, 電気学会産業計測制御研資, IIC-03-13 (2003-2)
- (17) V. Miranda and N. Fonseca: "EPSO-evolutionary Particle Swarm Optimization, a New Algorithm with Applications in Power Systems", Proc. of IEEE/PES T & D Conference and

Exhibition, Vol.2, pp.745–750 (2002)

- (18) H. Aoki and Y. Mizutani: “Voltage and Reactive Power Systems in Power Systems by Genetic Algorithm Considering Control Process”, *T. IEE Japan*, Vol.119-B, No.7, pp.757–764 (1999-7) (in Japanese)
青木秀憲・水谷芳史:「制御手順を考慮した遺伝アルゴリズムを用いる電圧無効電力制御」, 電学論 B, **119**, 7, pp.757–764 (1999-7)
- (19) 「電力系統の電圧・無効電力制御」, 電気学会技術報告, No.743 (1999)
- (20) H. Aoki and Y. Mizutani: “Voltage and Reactive Power Control in Power Systems by Genetic Algorithm Considering System Decomposition and Control Process”, *T. IEE Japan*, Vol.122-B, No.11, pp.1145–1156 (2002-11) (in Japanese)
青木秀憲・水谷芳史:「システム分割と制御手順を考慮した GA による電圧無効電力制御」, 電学論 B, **122**, 11, pp.1145–1156 (2002-11)

青木秀憲 (正員) 1952 年 5 月 8 日生。1979 年 3 月東海大学大学院修士課程修了。同年 4 月東海大学工学部助手, 専任講師を経て, 1998 年 4 月同助教授。現在に至る。主として電力系統の計画・運用・制御に関する研究に従事。

水谷芳史 (正員) 1944 年 2 月 18 日生。1968 年 3 月東海大学大学院修士課程修了。同年 4 月東海大学工学部助手, 1970 年 4 月同専任講師, 1976 年 4 月同助教授を経て, 1986 年同教授。工学博士。電力系統シミュレータの試作, 負荷周波数制御, 安定判別法, 電力系統の系統安定化制御・運用に関する研究に従事し現在に至る。計測自動制御学会, IEEE, 日本ファジィ学会会員。