

運用余裕を考慮した電圧・無効電力制御

岸 哲士^{*1} 道端郁夫^{*1} 青木 秀憲^{*2}

Voltage and Reactive Power Control Considering Operation Room by

Satosi KISHI^{*1}, Ikuo MICHIBATA^{*1} and Hidenori AOKI^{*2}

(Received on March 27, 2008 and accepted on July 9, 2008)

Abstract

Due to deregulation of the electric power market, the incidence of several power transactions and distributed generators will increase greatly. Because of this the power flow will increasingly vary, becoming more complex and uncertain. So it is difficult for voltage and reactive power control (VQC) to sustain adequate voltages in the power system. On the other hand, room is demanded from operation and control under a competitive environment in the power system. In order to obtain the optimal combination of parameters, namely, a large quantity of electric power control machinery controlled precisely and effectively, Meta-heuristic methods has been used for VQC. These methods, which allow for consideration of the trade-off among objects, should be applied to the problem.

In this paper, we propose the optimization of VQC with a genetic algorithm (GA), taking into account the operation room. The operation room is considered as a minimization of generator reactive outputs and tap positions difference from the neutral. The effectiveness of the proposed method is demonstrated by a practical 15-bus system.

Keywords: Voltage and reactive power control, Meta-heuristic, Trade-off, Tap position, Genetic algorithm

1. まえがき

世界的な経済の規制緩和によりわが国においても1995年から電気事業に関する規制緩和が実施された。これにより電力自由化の範囲が拡大され、2005年4月からは電気を取引する日本卸電力取引所(JEPX)が開設し、多様な市場参加者による系統利用が進められている⁽¹⁾。このような状況下において、将来、予想される運用状態として一般電気事業者あるいは卸電気事業者以外の事業者が発電設備を持ち、需要家に電気を供給する電力取引がますます増加するものと考えられる。さらに、規制緩和は系統に風力発電、太陽光発電、熱併給発電、燃料電池など様々な分散型電源(Distributed Generator: DG)を急速に普及させ、大量に連系することになる⁽²⁾。現段階では、これらが系統内に参入する場合のシステムが十分に設備されていないのが現状である。また、これに必要な発電設備や流通設備に関しても電力会社では設備拡充の合理化や効率化が求められているのが実状である。そのため、電力系統内では潮流の不確実性や電力品質の低下が生じ、供給信頼度の問題を発生する可能性がある。

これまで高信頼かつ安定した電力の供給を図るために系統制御には発電機のガバナフリー運転制御、負荷周波数制御(Load Frequency Control: LFC)による出力制御、経済負荷配分制御(Economic Load Dispatching Control: ELD)による発電機の出力調整を組み合わせた制御が行われ、電源脱落事

故に対する予備力確保という制御戦略が行われている。

しかしながら、電圧調整用機器や力率改善用調相設備等を用い系統内の電圧安定性や発電機無効電力の制約を満足しつつ、送電損失最小化を目的とする電圧・無効電力制御(Voltage and reactive power control: VQC)については単一目的に対してのみ検討が行われているだけで、設備運用の予備力すなわち調整余裕を検討した例⁽³⁾は、比較的少ないものとする。

これまで、VQCを取り扱う研究に対しては多くの最適化手法が適用されてきたが、近年では系統の巨大化・複雑化による問題規模の拡大により、膨大な解候補の中から効率よく準最適解を探索することが可能な組合せ最適化問題の実用的なツールとなっている遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)やParticle Swarm Optimization(PSO)などのメタヒューリスティック手法を用いた研究^{(4),(5)}が主流となっている。

著者らはこれまでに、送電損失最小化を目的としてGA⁽⁶⁾や、動物の群れの行動のアナロジーから開発されたPSOを適用⁽⁷⁾し、本問題に取り組んできた。しかし、送電損失最小化という単一目的の最適化では、電力供給者側に対して燃料コスト面での利益は得られるが、需要者側に対しては電力品質の一つとして定義されている電圧安定性維持が、制約値範囲内でしか実現できていないことになる。そのため、今後系統内に生じるものと思われる潮流の不確実性や電力品質の低下、さらに不測の事態に対処するには、限られた設備の中で、できるだけ調整に余裕のある制御を図る必要

* 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 工博

がある。

そこで、本論文では電力自由化の進展によって系統内に生じる問題に対応するために、目的関数にこれまでの電力を輸送するときに生じる送電損失最小化だけでなく、電力輸送時に車の走行時に必要となるエンジンオイルと同様な役目を果たす発電機無効電力の出力余裕と電圧の安定性を維持するために必要な負荷時タップ切換変圧器のタップ位置の偏差余裕を設けた新たな目的関数を提案する。また、本問題に対しては適用された例がない大規模系統への応用を考慮し、膨大な解候補の中から離散値と連続値を同時に扱うことができる GA を最適化手法として適応し、効率的な解探索を実現する。そして、実施した多目的な最適化に対する評価結果について検討を行った。本稿では、まず本手法を 15 母線系統に適用し、その効果を確認する。

2. 電圧・無効電力制御

電力消費の増大や、系統の複雑化は年々増加する傾向にあるが、系統運用者には常に安定した電力供給が求められている。特に、系統電圧に関しては電力品質の 1 つとして法規に定められており、電圧を適正に維持する制御が求められる。これについては、想定される電圧不安定現象を未然に防止するために電力系統には種々の調相設備が配置され、中央電圧・無効電力制御方式（中央 **VQC**）や個別電圧・無効電力制御方式（個別 **VQC**）など、系統実態に応じた種々の電圧無効電力制御方式が採用されている。これらの制御方式の目的⁶⁾には、（1）系統電圧の適正維持、（2）無効電力バランスの適正維持、（3）送電損失の低減、（4）機器操作回数の低減、（5）電圧安定性の維持などがあり、電力系統の運用状況、負荷の変化に応じて需要家電圧の適正維持や無効電力調整による送電損失などの調整が行われている。

〈2.1〉目的関数、制御変数および制約条件

本稿では、電圧・無効電力制御における送電損失最小化と調整に余裕を設けた制御を考慮するために次式に示す目的関数を設定する。第 1, 2 項は、送電損失と調相損失であり、電圧制御によって発生変化する損失を最小化する。第 3, 4 項は不確実な電圧変化に対する制御調整余裕を持たせるために第 3 項では即応性の高い発電機の無効出力を最小化することで電圧上下の調整余力を最大化することを目的とする項である。第 4 項は比較的緩慢な電圧変化に対する余力である。変圧器タップの中間位置からの偏差を最小化することで電圧上下の調整余力を最大化することを目的とする項である。第 5, 6 項は制約条件となる母線電圧と発電機無効電力である。いずれも電力輸送時には、設定範囲内で運用されなければならない項である。そのため、目的関数を求める際には運用時を考慮するため、いずれも零値となるべき項である。すなわち、目的関数にあるいずれの項も最小値とすることによって運用に余裕がある、より効果的な電圧・無効電力制御が図れる式を構成している。

〔目的関数〕

$$\left(\alpha \sum_{j=1}^l Plossj + \beta \sum_{k=1}^l Pscck + \gamma \sum_{i=1}^n Qgi + \delta \sum_{r=1}^s \Delta Tapr \right) + \eta \sum_{sk=1}^p (\rho sk)^2 + \lambda \sum_{sj=1}^v (qsj)^2 \quad (1)$$

Plossj : ブランチ *j* の有効電力損失 [pu],
Pscck : 調相母線 *k* の調相損失 [pu], **Qgi** : 発電機母線 *i* の無効出力 [pu], **ΔTapr** : 変圧器母線 *r* のタップ位置偏差, **ρsk** : 母線 *sk* の電圧制約逸脱量 [pu], **qsj** : 発電機母線 *sj* の無効出力制約逸脱量 [pu], **α** : 送電損失に対する重み, **β** : 調相投入損失に対する重み, **γ** : 発電機無効出力に対する重み, **δ** : 負荷時タップ変圧器のタップ位置に対する重み, **η** : 電圧の制約逸脱に対する重み, **λ** : 発電機の無効電力出力に対する重み。

なお、添字 **j, k, i, r, sk, sj** はそれぞれ対象となる母線やブランチを示している。

〔制御変数〕

一般に、電力系統の電圧・無効電力制御問題を行う場合に関与するおける制御変数は、電力用コンデンサ(**SC**)、分路リアクトル(**ShR**)、負荷時タップ切換変圧器(**LRT**)、および発電機の出力電圧(**Vg**)などの制御変数を切替え、送電損失の低減化を図る制御が行われている。これらの制御変数を次式のようなベクトル **X** で定義する。

$$\begin{aligned} \mathbf{X} = \{ & \mathbf{SC}, \mathbf{ShR}, \mathbf{LT}, \mathbf{Vg} \} \\ = \{ & \mathbf{SC}_1, \dots, \mathbf{SC}_c, \dots, \mathbf{SC}_i, \\ & \mathbf{ShR}_1, \dots, \mathbf{ShR}_d, \dots, \mathbf{ShR}_j, \\ & \mathbf{LT}_1, \dots, \mathbf{LT}_e, \dots, \mathbf{LT}_k \\ & \mathbf{Vg}_1, \dots, \mathbf{Vg}_f, \dots, \mathbf{Vg}_l \} \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、**SC_c** : *c* 番目の **SC** のバンク投入量,
ShR_d : *d* 番目の投入量, **LT_e** : *e* 番目の **LRT** のタップ位置, **Vg_f** : *f* 番目の発電機の端子電圧,
i : **SC** の設備台数台数, *j* : **ShR** の設備台数,
k : **LRT** の設備台数, *l* : **Vg** の設備台数。

そして、その制御量の上下限値を次のようにしている。

$$\mathbf{SC}_{low} \leq \mathbf{SC} \leq \mathbf{SC}_{high} \quad (3)$$

$$\mathbf{ShR}_{low} \leq \mathbf{ShR} \leq \mathbf{ShR}_{high} \quad (4)$$

$$\mathbf{LT}_{low} \leq \mathbf{LT} \leq \mathbf{LT}_{high} \quad (5)$$

$$\mathbf{Vg}_{low} \leq \mathbf{Vg} \leq \mathbf{Vg}_{high} \quad (6)$$

電圧・無効電力制御問題において、本GAを適用する際、 \mathbf{X} の各要素に対して、式(3)から式(6)の上下限値の可変範囲内に存在する制御ステップ値を、2進数の遺伝子列で表記し、個体を発生するアルゴリズムとなっている。本論文では、各制御変数に対して2進数で表現した各部分遺伝子列を部分遺伝子と名づける。

[制約条件]

系統内の潮流を計算する際、母線電圧 V_m と発電機無効電力 Q_g に対して、本論文では、次のように上下限値を満足する制約条件を設けている。

$$V_{m\text{low}} \leq V_m \leq V_{m\text{high}} \quad (7)$$

$$Q_{g\text{low}} \leq Q_g \leq Q_{g\text{high}} \quad (8)$$

(2.2) 目的関数の詳細

本節では、目的関数として提案した式(1)の各項について詳細を記述する。

第1, 2項は送電損失と調相損失に関する項あり、電力供給者側としてはコスト面での利益を期待することができる。第1項は電圧・無効電力制御問題においてこれまでのように送電線の送電損失最小化を目的として取り扱われているものである。したがって、電力供給者側に利益をもたらす経済性を考慮した目的関数となる。第2項は、調相設備を投入した際に発生する調相損失(有効電力の損失)である。この値は、その調相容量とその効率によって決まるものである。そのため、調相損失は母線電圧に依存することになるが本論文では簡単化するために電圧に依存しない定数項として扱っている。第1項, 2項の関数にはそれぞれ重み係数 α, β が乗じられている。

第3, 4項は調整余裕を考慮した項である。調整余裕は系統内の不確実な電圧変化に対する制御調整余力とし、これを定量化し、この余力を最大化することで操作予備力を確保することになる。無効電力出力による第3項は、急峻な電圧変化に対する調整余力となる。すなわち、即応性の高い発電機の無効電力出力を最小化することで電圧上下の調整余力を最大限に利用することができる。負荷時タップ切替変圧器による第4項は比較的緩慢な変化に対する調整余力である。制御対象機器の中でも電圧調整範囲が広い変圧器タップ中間位置からの偏差を最小化することで電圧上下の調整余力を最大化することになる。各項の関数には重み係数 γ, δ を乗じることで調整余裕を計算している。

第5, 6項は式(1)を求める際に実施する潮流計算において式(7), (8)にある母線電圧と発電機の無効電力出力の2つの制約条件を考慮した項である。これらは潮流計算終了後に求まる従属変数であり、制約条件が満足するか否かは計算後に決定される。各項の重み係数 η, λ は、制約逸脱解消を早期に図るための加速係数となる。そのため、本GAにおいて個体として生成する場合には、この制約を満足して第5, 6項の値が零となった個体が良好な解として採用されることになる。すなわち、各項に重み係数 η, λ を乗

じることで早期に制約逸脱のない個体が探索できるようにしたものである。第5項では母線電圧を適正に維持する制御が行われ、第6項では機器保護の立場から守らなければ制約である。

各項の重みについては、試行錯誤的に決定されるものであるが、例えば前述したように本GAのように早期に制約逸脱を解消するには第5, 6項にある重み係数 η, λ を高くすればよいが、必ずしも最終的に目的関数が良好な最適解を示す保障はないものとする。また、本問題は任意のある時間のみを捉えた解析であるが、時系列の解析において、負荷が急変する時間帯や系統事故が予想される場合には、第3, 4項にある重み係数 γ, δ を高くすることで電力供給者側の意図に沿った運用操作が可能となる最適解が得られるものと思われる。

3. 遺伝的アルゴリズム (GA) の流れ

歴史的にみるとGAはHolland,J.によって1975年に導入された手法⁽⁹⁾で、生物のもつ遺伝子の進化の法則を模倣した人工進化論システムである。すなわち、長い年月をかけて生物が進化してきたような遺伝的な法則を工学的にモデル化し、これを参考にして工学的に役立つような学習方法を与えたものである。図1に示すようなフローチャートに基づいて自然界における生物の進化過程を模倣し、世代ごとある世代を形成している個体集合の中で目的関数の高い値の個体が生き残るように構成されたアルゴリズムである。

まず、初期の運転状態から新たな個体群を生成する。これを初期生物集団の生成という。次に、これを目的関数値の順に基づいてランク付けし、淘汰すべき個体を選択する。この淘汰率によって増殖すべき個体数が決定される。この増殖は、交差や突然変異によって行われ、次の世代の個体集団を形成することになる。この個体集団が2世代目から

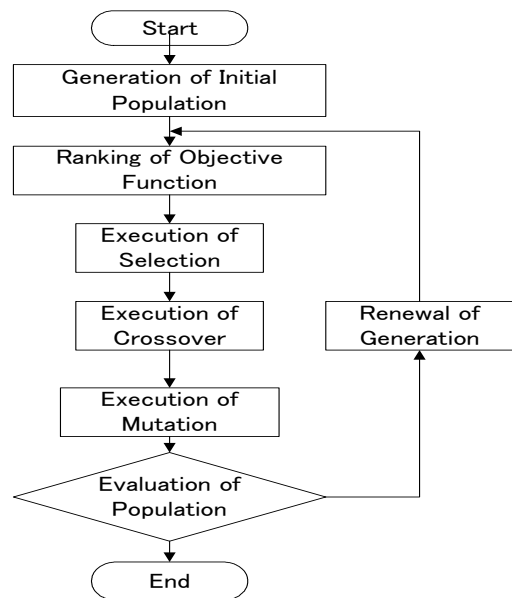


Fig.1 Flow chart

目的関数のランク付けの評価対象となり、世代を繰り返しながら最適解を探索することになる。本研究ではこれを電力系統に適用し、系統内にある制御変数をパラメータと見なし、GA で使用される遺伝子を各制御変数に割り当て、交差、突然変異などを実施している。

解探索のフローチャートを図 1 のステップに基づいて、その処理を以下に簡単に記述する。

[開始] SC, ShR, LT, Vg 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 ビットで各部分遺伝子を形成し、これらによって初期運転状態を表わす個体を表現する。

[初期生物集団の生成] 初期生物集団の生成において、遺伝子操作の際に、部分遺伝子の 1 個を入れ替える。この状態で潮流計算を実行し、制約条件を満足しているならば、この個体が初期生物集団を形成する個体として採用される。これを繰り返し、個体数 m_0 個の初期生物集団を作る。

[目的関数をランク付け] 目的関数値の高い順に並べる。

[淘汰の実行] 目的関数値の低い下位 40% を淘汰する。

[交差の実行] まず、親個体 A,B を淘汰以外の個体から乱数を用いて選択する。これらの個体の同じ部分遺伝子同士を入れ替え、制約条件を満足しているならば、個体として採用する。これを繰り返し、淘汰した個体数をすべて増殖し、個体群を再び形成する。

[突然変異の実行] 突然変異率を考慮し、一点突然変異を実行し、制約条件を満足しているならば、個体として採用する。このアルゴリズムの操作は、GA において探索空間を広げる役割を果たしている。また、エリート保存戦略も実行され、目的関数値の最大個体に対し突然変異は行わない。

[収束判定] 生成された生物集団の目的関数値がその集団の最大目的関数値と 90% 以上一致した場合、または、終了世代に達した場合、本 GA の操作を終了する。そうでなければ、**[目的関数をランク付け]** の手順に移行する。

なお、これについてのさらなる詳細は参考文献(6)に記載しているので参照していただければと思います。

4. シミュレーション結果と検討

本稿では本手法を図 2 に示す 15 母線系統に適用し、目的関数に設けた各項による制御調整について検証する。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 : 線路 1,2,3,4,7,12), Vg(4 : 母線 1,2,3,4)} を配置している。まず、初期運転状態には SC 容量が動作していないものとする。また、ShR と Vg の位置はそれぞれ中間値を示しているものとする。さらに、運転状態にある 6 箇所のタップ位置については、それぞれ 1.006667, 1.046667, 1.060000, 1.073333, 1.086667, 1.100000 にあるものとして計算開始条件を設定する。これらの制御変数の投入容量を変化させて本 GA に基づく最適化を突然変異率 35% として 50 世代まで計算を実施している。このとき使用する機種は EWS4800/320PX (500MHz)

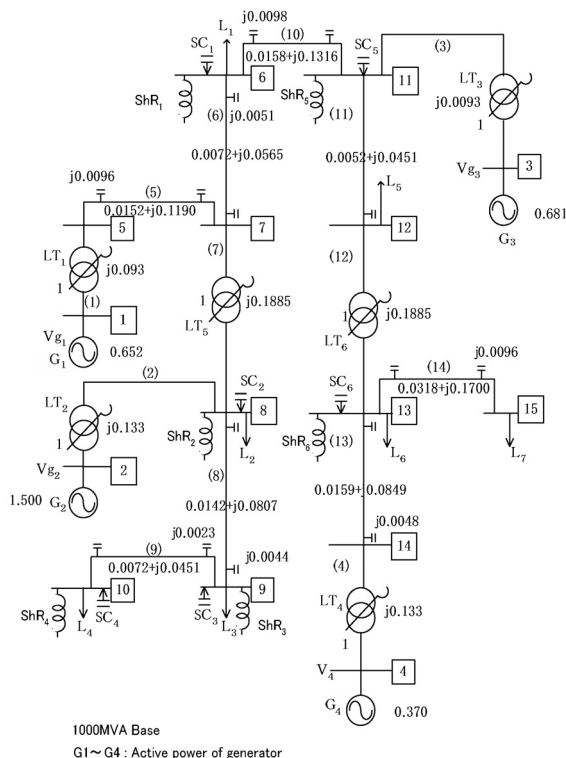


Fig.2 Transmission system model

NEC 製である。

表 1 は、本送電系統モデルに対する運用条件の範囲を示すシミュレーション条件である。また、調相設備を投入した際に発生する調相損失の総和値は 0.0006 としている。なお、これらの電力潮流計算には Newton-Raphson 法が用いられている。表 2 は、初期運転状態における各項の運用状態を示したものである。また表 3 は、今回の系統状態に対してシミュレーションに用いた重み係数を示している。いずれも試行錯誤によって決定した値である。表 4 は初期運転状態から本手法を用いて計算した 50 世代までの解析結果である。表 5 は、表 4 と比較するために、これまで単一目的

Table.1 Details of model system

Restriction of $V_{m\text{low}}$ and $V_{m\text{high}}$ limit			
$V_{m\text{low}}$	0.90	$V_{m\text{high}}$	1.10
Range of generator reactive power limit			
G_1	$-0.23 \leq Q_{g1} \leq 0.40$	G_2	$-0.60 \leq Q_{g2} \leq 1.50$
G_3	$-0.27 \leq Q_{g3} \leq 0.50$	G_4	$-0.15 \leq Q_{g4} \leq 0.37$
Controlled parameter			
Controller	Initial statement	Range of controller	
SC	0.000	$0.00 \leq SC_c \leq 0.60$	
ShR	0.000	$0.00 \leq ShR_d \leq 0.40$	
LT	1.000	$0.90 \leq LT_e \leq 1.10$	
Vg	1.000	$0.90 \leq Vg_f \leq 1.10$	
Load data			
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	$0.525+j0.010$

Table.2 Initial condition set

Total of electric power loss	0.07207[p.u]	72.07[MW]
Total of generator reactive power outputs	2.34183[p.u]	2341[MVar]
Total of tap positions difference from the neutral	0.33333	

Table.3 Weights for objective function

Weight	Value
α (Ploss)	1.0
β (Psc)	0.1
γ (Qg)	9.0
δ (Δ Tapr)	0.6
η (ρ s)	100
λ (\mathbf{q} s)	50

Table.4 Results of proposed method

Total of electric power loss	0.03995 [p.u]	39.95 [MW]
Total of generator reactive power outputs	-1.418E-05 [p.u]	-14.18[KVar]
Total of tap positions difference from the neutral	0.13333	

Table.5 Results of conventional method

Total of electric power loss	0.03822 [p.u]	38.22 [MW]
Total of generator reactive power outputs	1.991E-01 [p.u]	199.1 [MVar]
Total of tap positions difference from the neutral	0.21333	

として従来手法によって実施されてきた送電損失のみを考慮したときに得られる50世代までの計算結果である。

まず、提案する目的関数の妥当性を確認するために表2の初期運転状態から本手法と従来手法によって目的関数にある各項目が、どのように変更されるかを表4、表5を用いて比較・検討する。両者の制御結果は、表2の初期運転状態に対して送電損失、発電機無効電力出力、母線のタップ位置偏差のいずれの値においても低減できていることがわかる。送電損失については、本手法にある目的関数よりも従来手法の目的関数として用いられる第1項、第5項、第6項の加算関数がより効果的であることがわかる。しかし、発電機の無効電力出力については本手法によって大幅に軽減されていることがわかる。また、母線のタップ位置偏差についても本手法による結果が従来手法よりも低減できていることがわかる。したがって、本手法は発電機無効電力出力とタップ位置偏差の調整余裕を大きく改善でき、制御余裕の確保という目的を実現できることがわかる。このよ

うに提案する目的関数にある送電損失の最小化と調整余裕についてはトレードオフの関係にあるが、本手法は現実的な解を探索することを可能にしているものと考えられる。なお、本手法に要する計算時間は約2分12秒である。

5. まとめ

本論文は、電力自由化の進展に伴うコストダウンと不確実性に対応するための電圧・無効電力制御問題について検討している。より効果的な制御を図るために、従来から単一目的の最適化としてある送電損失の最小化に加え、発電機無効出力と変圧器タップ中間位置偏差を制御調整余裕項として目的関数に加味した多目的な最適化手法を提案した。結果として、本手法は送電損失については単一目的である従来手法に劣るものの、無効電力出力は従来手法よりも零に近い値となり制御調整余力が確保できていることがわかる。さらに変圧器タップ位置偏差についても中間位置からの偏差を従来手法よりも小さくすることができ、制御余裕を確保できていることがわかる。以上のことから、本手法により電力システムの柔軟な運用形態の構築を実現できることが明らかとなった。

今後は、本手法を大規模システムにも適用し、その効果を確認する。さらに、他のメタヒューリスティック手法についても検討し、更なる改善を図る予定である。

参考文献

- (1) 例えば、経済産業省資源エネルギー庁：「電気事業制度改革の実効性分析」報告書 平成18年3月 (2006)
- (2) 例えば、経済産業省資源エネルギー庁ホームページ <http://www.enecho.meti.go.jp/>
- (3) 中地芳紀・加藤敦志・鶴飼裕之：「経済性とセキュリティを考慮したタップサーチによる電圧・無効電力制御の最適化」, 電学論 B, Vol.128-B, No.1 pp.305-311 (2008-1)
- (4) 電力システムのメタヒューリスティクス応用編集委員会編：「電力システムへのメタヒューリスティクス応用技術」, 電気学会技術報告第923号 (2003)
- (5) 例えば、青木秀憲・水谷芳史：「電力システムにおける PSO の解説とその応用」, 電学論 B, Vol.126-B, No.3 pp.279-282 (2006-3)
- (6) 青木秀憲・水谷芳史：「系統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, Vol.122-B, No.11 pp.1145-1156 (2002-11)
- (7) 青木秀憲・水谷芳史：「制御手順を考慮した PSO による電圧無効電力制御」, 電学論 B, Vol.124-B, No.1 pp.95-102 (2004-1)
- (8) 電力システムの電圧・無効電力制御調査専門委員会編：「電力システムの電圧・無効電力制御」, 電気学会技術報告第743号 (1999)
- (9) J.H.Holland : "Adaptation in Natural and Artificial Systems", The University of Michigan, 1975., and MIT Press, 1992