メタヒューリスティクスを用いた CGS 及び複数蓄エネルギー設備を含む
エネルギーシステムの多目的非線形最適化手法の開発DEVELOPMENT OF A METAHEURISTIC NONLINEAR MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION METHOD
FOR OPERATING ENERGY SYSTEMS INCLUDING CGS AND ENERGY STORAGE SYSTEMS

池田 伸太郎*, 大岡 龍三**

Shintaro IKEDA and Ryoza OOKA

Co-generation systems (CGS) and energy storage equipment, such as batteries and thermal energy storage (TES), have become increasingly important recently for improving energy efficiency and for adjusting or reducing peak loads of energy systems. However, optimization of operating schedules of such energy storage equipment is difficult due to its parameter dependency. In addition, a nonlinear characteristics of recent heat-source machines have made the problem more difficult. Therefore, we applied an efficient optimization method, ϵ DE (epsilon constrained differential evolution) for single objective optimization, to minimize operating costs. Moreover, we proposed ϵ MODE (epsilon constrained multi-objective differential evolution) to solve the complex trade-off problem (costs vs primary energy consumption). Each result showed that these methods could provide the optimum solution in a practical time, even if the problem had a lot of decision variables that were nonlinear. In particular, ϵ MODE could carry out a lot of non-dominated solutions without concentrating on a certain position and generating dominated solutions.

Keywords : CGS, Battery, Thermal Energy Storage, Energy System Optimization, Metaheuristics

CGS, 蓄電池, 蓄熱槽, エネルギーシステム最適化, メタヒューリスティクス

1. はじめに

近年、コージェネレーションシステム (CGS) や蓄熱槽 (TES: Thermal energy storage) 等の蓄エネ設備が注目されて久しい。加えて、熱源機の効率的な運転を可能とするインバータ技術等も普及している。しかし、それらの運用を統合的に最適化することは容易でない。その主な理由として、1) CGS 導入による運転計画の選択肢 (操作変数) の増加、2) インバータ技術や流量、温度計算に用いる非線形形状、3) 蓄エネ設備最適化における変数間依存性、以上 3 点が挙げられる。1) は、CGS からの排熱を熱源機や給湯需要などに供給するルートの選択肢が拡大し、最適化問題がより大規模化・複雑化することを意味する。CGS を含む大規模システムに関する研究として代表的なものでは伊東の一連の研究¹⁾が、近年では 2 棟の建物を対象に一方の CGS からの電力・排熱の融通を考慮した石田ら²⁾や、それを拡張し 2 棟それぞれの CGS の共有及び売電を含めた最適運用を検討した Kayo ら³⁾、地域冷暖房を対象に解析範囲を街区レベルまで発展させた Buoro ら⁴⁾の研究等がある。しかし、上記の研究は蓄熱槽や蓄電池を考慮しておらず、蓄エネ設備の将来性を鑑みればそれらを考慮した研究が期待される。2) は、インバータ技術等による熱源機等の非線形特性がもたらす最適化問題の難化を意味する。前述の伊東¹⁾、Buoro ら⁴⁾の研究を始め、広く適用されている混合

整数線形計画法 (MILP: Mixed-integer linear programming) は、非線形関数を線形化することにより本来複雑な目的関数及び制約条件を簡易なモデルとして扱うことを目的としており、その結果、大規模なシステムや複数年解析などが可能となった^{5),6)}。線形化によるアプローチは強力な手法であるが、現在、インバータ技術が普及し冷却水温度や流量などによって元々非線形な性能曲線の形状が更に連続的に変化するなど、複雑な非線形特性がシステムの一次エネルギー消費量等の増減に与える影響は少なくない。従って、本来ならば非線形関数をそのまま処理することが望ましいと考える。また、Facci ら⁷⁾が CHCP (Combined heat power and cooling) の運用最適化に用いた動的計画法 (DP: Dynamic programming) は、非線形形状を扱うことができ、全探索と比較すると効率的な探索が可能であるが、筆者らは既報⁸⁾にて DP の計算時間に関して言及しており、それに対して、高精度を維持したまま高速な計算が可能な「メタヒューリスティクス」という最適化手法を提案している。ここで、メタヒューリスティクスとは遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic algorithm) に代表される反復学習的な手法の総称である。3) では、蓄エネ設備がエネルギーを貯める時間と使う時間とが異なることによる最適化問題の難化を意味する。具体的には、各時刻における熱源出力の組合せ最適化のみならず、解析期間全体での組合せ最適化

* 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 博士課程
日本学術振興会特別研究員 DC

** 東京大学生産技術研究所 教授・博士 (工学)

Ph.D. Student, Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, JSPS Research Fellow
Prof., Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Ph.D.

なお、本報で対象とする非線形最適化問題は、計算機科学における NP 困難と呼ばれる多項式時間で真の最適解を得ることは出来ない問題と認識されている。その問題に対して、メタヒューリスティクスでは確率論的探索によって解を得るため、厳密には準最適解という位置づけになるが、本分野では慣例的に最適解という言葉が使用されているため、本報でも最適解という表現を使う。

本研究では、熱源機からの出力や TES の蓄放熱をモデル化するために、熱量ベース(kW, kWh)での計算を行っており、簡易化の為に冷水温度及び温水温度は Fig.2 に示した数値に固定している。一方で、熱源の部分負荷運転を考慮するために、流量は変流量方式を採用した。また、冷却塔を有する熱源(TR, AR, HRAR)に関しては、冷却水温度が運転効率に大きく影響するため、熱源—冷却塔間の冷却水温度及び冷却水流量を両方とも変動させている。ただし、同時に変化させると値が一意的に定まらないため、始めに冷却水流量を定格とし冷却水温度を変化させ、冷却水入口温度と出口温度の差が 3℃以下になった場合のみ冷却水流量を変化(減少)させた。冷却水温度等の計算には後述する熱源機器の特性と同じく LCEM tool¹⁴⁾を参照している。著者の既報¹⁵⁾と同様に、外気乾球温度と相対湿度から水蒸気分圧等を求め、最終的に外気湿球温度を算出し、冷却塔の冷却水出口温度を計算する。その出口温度を熱源の冷却水入口温度とし出力との関係から熱源からの冷却水出口温度を計算し、冷却塔に戻す。冷却塔ファンは定格冷却水量を基準に 50%を下限、110%を上限として連続的に運転できるものと仮定する。

上記の熱源機器等に加えて、蓄電池(B)及び PV も考慮した。PV からの電力分配ルートは、1) 蓄電池への供給、2) 一般電力需要への供給、3) 売電、の 3 通りを想定しており、蓄電池は、1) 一般電力需要への供給、2) 売電の 2 通りを想定した。また、一次エネルギー消費量(電気): 9.97 MJ/kWh、(ガス): 45.0 MJ/m³、3) CO₂排出量(電気): 0.512 kg-CO₂/kWh、(ガス): 2.29 kg-CO₂/m³である。

2.3 熱源機器の特性

ポンプ類を含む熱源機の特性は LCEM tool を参照している。従って、BB を除く全ての熱源機は非線形形状の特性を持つ(Fig.3)。Fig. 3(a)は定格燃料消費量に対する部分負荷時の燃料消費率を示している。ただし、HRAR は排熱投入の有無によって燃料消費率が変化するため、Fig.3 (a)には定格値まで排熱を投入した場合の特性曲線を示した。Fig.3 (b)には、単位エネルギー(MJ)投入当たりの生成熱量(MJ)を示した。意味合いとしては電気主体熱源の COP と同様であるが、一次エネルギー基準の効率であることに注意されたい。投入エネルギーには前述の一次エネルギー換算係数を、生成熱量に関しては 1 時間生成するものとし、1kWh = 3.6MJ とした。HRAR は投入エネルギーとして電気、ガス、排熱を考慮した。Fig.3 の各熱源機器の特性曲線は、冷却水温度 32℃、外気温 25℃を想定した際の形状であり、それぞれが変化することによって連続的に関数形状も変化する。従って、特に Fig.3 (b)に示した効率の順位が、最適化計算の際にそのまま利用できるわけではないことに注意されたい。なお、CGS は LCEM ツールに収録されていない為、機器容量や効率等は既往文献¹⁶⁾を参照し、特性曲線は次のように別途モデル化を行なった。文献¹⁷⁾を参考に、定格運転時、稼働率 75%時、同 50%時の発電効率及び排熱効率をプロットし、文献¹⁸⁾を参考にそれぞれ二次曲線で近似することで効率曲線を作成した(Fig.4)。

3. 定式化と最適化手法

3.1 定式化

本研究では 24 時間の運用コスト最小化を目的として最適化計算

Table 1 Information of energy systems

Absorption refrigerator (AR)	Capacity	1500 kW
	Rate gas consumption	86.8 m ³ /h
	Rate electric consumption	15 kW
Heat recovered AR (HRAR)	Capacity	1000 kW
	Rate gas consumption	59.4 m ³ /h
	Rate electric consumption	9.85 kW
	Rate amount of recovered heat	307 kW
Air-source heat pump 1 (AHP1)	Capacity	550 kW
	Rate electric consumption	153.4 kW
Air-source heat pump 2 (AHP2)	Capacity	500 kW
	Rate electric consumption	139.5 kW
Co-generation system (CGS)	Capacity	363 kW
	Rate amount of recovered heat	300 kW
	Rate gas consumption	71.3 m ³ /h
Backup boiler (BB)	Capacity	750 kW
	Rate gas consumption	73 m ³ /h
	Rate electric consumption	2.1 kW
Thermal energy storage - cooling demand (TES-C)	Capacity	10000 kWh
	Charging/discharging efficiency	100 %/cycle
	Self heat loss rate	5 %/day (0.2 %/h)
Thermal energy storage - hot water demand (TES-H)	Capacity	1200 kWh
	Charging/discharging efficiency	100 %/cycle
	Self heat loss rate	5 %/day (0.2 %/h)
Battery (B)	Capacity	500 kWh
	Maximum charge/discharge	100 kW
	Charging/discharging efficiency	81 %/cycle
	Self-discharge rate	0 %/day
Photovoltaic device (PV)	Area	1000 m ²
	Conversion efficiency	13 %
	Conversion efficiency of power conditioner	97 %

Fig. 3 Characteristics of heat source machines,

(a) Partial load rate – Energy consumption rate,

(b) Partial load rate – Machine efficiency

Fig. 4 Characteristics of CGS

を行なった。目的関数は次の式(1)で表される。

$$\begin{aligned}
\min f &= \sum_{t=1}^{TimeH} \{c_{elec-buy}^t(D_{elec}^t + acd^t - BtoD_{elec}^t - PVtoD_{elec}^t \\
&- CGStoD_{elec}^t) - c_{elec-sold}^t(BtoG^t + PVtoG^t)\} \\
&+ \sum_{t=1}^{TimeH} \{c_{elec-buy}^t(EC_{TES-C}^t + EC_{TR}^t + EC_{AR}^t + EC_{HRAR}^t + EC_{AHP1}^t \\
&+ EC_{AHP2}^t + EC_{CGS}^t + EC_{BB}^t) \\
&+ \sum_{t=1}^{TimeH} \{c_{gas-buy}^t(GC_{AR}^t + GC_{HRAR}^t + GC_{CGS}^t + GC_{BB}^t)\}
\end{aligned} \quad (1)$$

$TimeH$ は解析期間(24 h)、 $c_{o-\Delta\Delta}^t$ は時刻 t の $elec-buy$ が買電単価(yen/kWh)、 $elec-sold$ が売電単価、 $gas-buy$ がガス単価(yen/m³)である。 D_{elec}^t は一般電力需要(kWh)、 acd^t は蓄電量(kWh)、 $XtoY$ は機器 X から機器 Y もしくは需要/グリッド(G)への分配電力(kWh)、 EC_{Δ}^t は一次ポンプ等の周辺機器を含む機器 Δ の電力消費量(kWh)、 GC_{Δ}^t は機器 Δ のガス消費量(m³/h)である。制約条件は下記の通りである。

$$|acd^t| \leq Maxacd \quad (2)$$

$$\begin{cases} PVtoB^t = 0 & (acd^t \geq 0: \text{放電}) \\ PVtoB^t \leq |acd^t| & (acd^t < 0: \text{蓄電}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} BtoD_{elec}^t + PVtoD_{elec}^t + CGStoD_{elec}^t (acd^t \geq 0) \\ \leq D_{elec}^t \\ PVtoB^t + PVtoD_{elec}^t + CGStoD_{elec}^t (acd^t < 0) \\ \leq D_{elec}^t + |acd^t| \end{cases} \quad (4)$$

$$0 \leq P_{TR}^t \leq MaxP_{TR} \quad (5)$$

$$0 \leq P_{BB}^t \leq MaxP_{BB} \quad (6)$$

式(2)は蓄電池の最大蓄放電量(kWh)に関する制約である。式(3)はPVと蓄電池の稼働状況に関する制約であり、蓄電池が放電の時は、PVから蓄電池への電力供給は0に、蓄電池が蓄電しているときは、その蓄電量以下になるように設定する。なお、PVからの電力供給はPVが発電しているときのみ正の値をとり、それ以外の時間帯では0を初期値として与えている。各ルートへの電力供給割合は後述の操作変数値から決定する。式(4)は一般電力需要に関する制約であり、蓄電池(B)、PV、CGSからの電力供給量が一般電力需要を上回らないようにする。これは、仮に式(4)を設定しない場合、需要への分配ルートから得られる合計電力が需要を上回ることが可能となり、その差を売電電力とすることが考えられるが、そのようにするとどの機器からの電力がグリッドに売電されたのかが決定できない。従って、式(4)を設定することによって各ルートを重複させず各機器からの電力の流れを明らかにすることが可能となる。操作変数は、14種類 24時間分の計 336変数 $\in[0,1]$ であり次に示す通りである。1) 定格蓄電容量に対する蓄電率、2) 放電量分配率: 蓄電池→グリッド、3) 放電量分配率: 蓄電池→一般電力需要、4) PV発電電力分配率: PV→グリッド、5) PV発電電力分配率: PV→蓄電池、6) PV発電電力分配率: PV→一般電力需要、7) 空調用蓄熱槽、定格蓄熱量に対する蓄熱率、8) 給湯用蓄熱槽、定格蓄熱量に対する蓄熱率、9) AR部分負荷率、10) HRAR部分負荷率、11) AHP1部分負荷率、12) AHP2部分負荷率、13) CGS発電率、14) CGS→HRAR出力分配率、以上である。なお、上記に含まれていないTR及びBBの出力は、蓄放熱量及びその他熱源機器の出力と需要のバランス式から求めて

Fig. 5 Searching process of ϵ DE and ϵ MODE, (a) Epsilon constraint method of ϵ DE, (b) NDS and CDA of ϵ MODE

おり、この定式化操作により制約条件から等式条件を排除している。また、式(5)及び式(6)はTRとBBの出力に関する制約であり、それぞれTRの最大出力 $MaxP_{TR}$ 以下、BBの最大出力 $MaxP_{BB}$ 以下に制限することを条件としている。

3.2 最適化手法

3.2.1 ϵ DE

一般的に最適化問題では目的関数の景観は事前に知り得ないため、特に非線形最適化では、局所解が複数存在する「多峰性関数」を想定した場合でも十分解析可能な汎用性の高い最適化手法を適用する必要がある。そこで本研究では、筆者らの既報⁹⁾において有効性を示したメタヒューリスティクスの中でも、制約条件を効率的に処理する手法としてTakahamaら⁹⁾が提案した ϵ DE (epsilon constrained differential evolution)を採用した。 ϵ DEは制約条件をどの程度逸脱しているかを表す制約逸脱度 φ を式(7)で定義し、式(8)によって φ と目的関数値 f の最小化を図る手法である。

$$\varphi(x_i) = \sum_j \max\{0, g_j(x_j)\}^p + \sum_j |h_j(x_i)|^p \quad (7)$$

$$(f_1, \varphi_1) <_{\epsilon} (f_2, \varphi_2) \Leftrightarrow \begin{cases} f_1 < f_2 & \text{if } \varphi_1, \varphi_2 \leq \epsilon \\ f_1 < f_2 & \text{if } \varphi_1 = \varphi_2 \\ \varphi_1 < \varphi_2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 p は正数であり、通常1に設定する。式(7)は i 番目の個体(x_i)の制約逸脱度 $\varphi(x_i)$ で、不等式制約 $g_j(x_j)$ の逸脱度と等式制約 $h_j(x_i)$ の逸脱度の合計を示している。式(8)は個体同士の比較方法を示している。 ϵ DEではどの程度逸脱を許容するかを示す ϵ を指数関数的に減少させ、事前に定めた世代数で0に設定する。 ϵ が0の時、制約逸脱は全く許容されないが、探索当初からその条件では制約条件が厳しい問題において実行可能解が見つからずに探索が終了する可能性がある。そこで、探索当初は ϵ の値に余裕を持たせ、世代数が進むにつれて減少させるという方針をとる。前世代の個体の逸脱度 φ_1 と新世代の個体の逸脱度 φ_2 と ϵ を式(8)のように比較し、その大小関係により、個体の入れ替えを目的関数値 f_1, f_2 で比較するのか、逸脱度で比較するのかを決定する。世代が進むと ϵ が減少し制約逸脱条件が厳しくなるため、Fig. 5(a)に示すように個体は徐々に実行可能領域内に入ってくる。本研究では個体数を100個、世代数を10000世代としており、5000世代において $\epsilon = 0$ とした。

3.2.2 ϵ MODE

本研究では多目的最適化も同時に検討した。制約条件の処理手法

として優れている ϵ DEを多目的に拡張する為、Ali ら¹⁰⁾が提案したMODEA(Multi-objective differential evolution algorithm)と ϵ DEを組み合わせた「 ϵ MODE」を提案する。MODEA では多目的化における多様性確保策として、Deb ら¹⁹⁾が提案した Non-dominated sorting (NDS)と Crowding distance assignment (CDA)をDEに適用しており、パレート最適解が既知のテスト関数にて良好な結果を示している。NDS や CDA 等の詳細は文献 11)及び 19)に記載されているが、概要は以下のとおりである。

Non-dominated sorting とは Fig. 5(b)に示すように、全個体に対して、パレート解を構成する個体毎に F1, F2,...(FRank という)とグループ化し、F1 から順にランキング形式で次世代へ継承させる。通常、DE では世代 g の i 番目の個体 x_i^g と次世代の x_i^{g+1} の目的関数値を比較し良いほうを残すといういわゆる離散世代モデルを用いているのに対し、Deb らや Ali らの手法では最終的な世代間移行時に、世代 g の全個体と世代 $g+1$ の全個体を総比較して上位個体群を継承する方針(アーカイブ方式)をとっている。しかし、 ϵ MODE ではまず φ の単目的最小化を行ない実行可能解を生成しつつ、NDSにより多目的化を行なう為、Ali らの手法では φ を最小化する途中で、ある特定の座標を持つ個体が急速に増加し局所解に至ってしまう。そこで、本研究では、 φ の最小化時、つまり ϵ 制約法の作用時は通常の離散世代モデルを使用し、実行可能個体に対してのみ MODEA アルゴリズムを適用する。次に、CDA とは、同一 FRank 内の個体群に対して、各目的関数値の最小値を持つ個体(各軸の端の個体)を除く、個体に対して、個体同士が離れていればいるほど評価が高くなるようにランク付けを行なう手法である。これにより個体がある点に密集することなく、広くパレート解を形成することが可能になる。

4. 単目的最適化

4.1 ケース設定

本研究では次の 3 ケースを用いて ϵ DE の利用可能性を考察する。

- 1) Case 1: CGS を導入しないモデル。ただし CGS の排熱利用が考慮されていない為、Table 1 の BB 容量では給湯需要を賄うことが出来ないことから容量を 900kW に増加させた。
- 2) Case 2: シナリオベースの運用計画。最適化手法を使うのではなく予め場合分けして定めてある運用計画に従うケースであり、現在、経験的に運用している一般的なケースを想定する。今回は、次のように設定した。i) PV は全量売電、ii) 蓄電池は日中は全量需要へ供給し、夜間(18~23 時)は電気料金の売買価格の差を利用してグリッドへ売電することで収益を得る方針をとる。なお、現状の制度としては蓄電池からグリッドへの売電は許可されていないが、 ϵ DE を評価する際の売電ルートに関する操作変数の数の増加への対応、そして、売電価格及び買電価格の大小関係に応じて適切な最適化が可能か否かを判断するための試行実験としての計算条件である。 ϵ DE で探索した場合もこのような運用になると予想されるため、Case 2 においても平等になるように想定した。iii) 熱源機は定格 COP の良いものから優先的に稼働させる方針をとり、0~7 時まで及び 18~23 時までの電気料金が相対的に安い時間帯は TR, AHP1, AHP2, AR, HRAR の順で、日中(8~17 時)は電気料金が相対的に高いため、

Fig. 6 Operating scenarios of a battery and TESs (Case 2)

Table 2 Results of single objective optimization

	Operating costs (yen/day)	Primary energy consumption (MJ/day)	CO ₂ emissions (kg-CO ₂ /day)
Case 1	825467	400089	20485
Case 2	765444	393073	20099
Case 3	721983	376879	19284

AR, HRAR, TR, AHP1, AHP2 の順で稼働させる。iv) 蓄電池及び TES-C、TES-H は電気料金が最も安い 0~4 時までの間にそれぞれ 1 時間で 100kWh, 2000kWh, 240kWh ずつ貯め、5 時までにエネルギーを貯めきる。日中は電気料金の高い時間帯に最大限放エネするが、13~17 時の冷房需要は熱源だけでは賄いきれないためその差を賄う分を放熱する。TES-H は 8~15 時にかけて 150kWh ずつ放熱する。残存エネルギー量の変化を Fig. 6 に示す。破線は蓄電池の残存エネルギー量の変化を示しているが、前述したように、18~23 時までの運転ではグリッドから蓄電池へ貯め、グリッドへ売することで収益を得ている。v) CGS は電力需要に合わせて発電させ、日中の不足分は蓄電池もしくはグリッドから買電する。排熱は給湯需要へ優先的に供給し、余った分は蓄熱槽へ供給する。日中の熱供給の不足分は BB の稼働で補う。

3) Case 3: ϵ DE より最適解を探索する。

上記 3 ケースの結果を Table 2 に示す。CGS を有さない Case 1 と比較し、CGS を導入しシナリオベースの運用計画でシミュレーションした Case 2 は目的関数である運用コストが 7.3%削減されており、CGS 導入の効果は高いと言える。その Case 2 に対し、本研究で提案する ϵ DE による運用(Case 3)では、更に 5.7%運用コストを削減することができた。従って、経験的なシナリオベースの運用手法よりも本研究の最適化手法の方が結果がよく、 ϵ DE の利用可能性は高いものと言える。以下では ϵ DE によって得られた Case 3 の結果を考察する。

4.2 一般電力系統の最適運用

Fig. 7 に一般電力系統全体の最適運用を示す。日中の買電単価が高い時間帯に CGS が稼働しグリッドからの買電量を抑えている。夜間は買電単価が安いこと、そして給湯需要が少ないことから CGS は稼働せずグリッドから買電している。蓄電池の稼働状況を示した Fig. 8(b)では、売電価格が買電価格を上回る早朝及び夜間は蓄電を行なうか、もしくはグリッドへの売電が行なわれている。

Fig. 7 Optimal operation of the electric system

Fig. 8 Optimal operation, (a) PV, (b) Battery

PV からの発電電力の分配を示した Fig. 8(a)では、蓄電池と同様に売電価格が買電価格を上回る早朝及び夕方売電し、日中は全て一般電力需要に分配している。また、PV から蓄電池へのルートは選択されていない。これは蓄放電効率(81%/cycle)によりエネルギーロスが生じることから、選択されなかったものと考えられる。

4.3 空調システムの最適運用

蓄熱槽は自己放熱損失(0.2%/h)以外での熱ロスとは考慮していないため、蓄電池ほど電気料金の差異の影響を受けない。ただし、蓄熱槽が稼働すると蓄熱時には熱源が、放熱時にはポンプが稼働することから、その分電力消費量が上乗せされる。従って、蓄熱槽に関しても電気料金が安い時間帯に蓄熱し、高い時間帯に放熱することが望ましいと考えられる。特に日中の放熱によって熱源機の負荷を低減させている。

空調システムの運用計画を示した Fig. 9 をみると、夜間に蓄熱し、日中に放熱していることがわかる。また、夜間は電気料金が安いので電気系の機器(TR, AHP1, AHP2)を優先的に稼働させ蓄熱を行っており、日中はガス料金が相対的に安いのでガス系の機器(AR, HRAR)を優先的に稼働させ、残りを TR 及び AHP で賄う合理的な結果が得られている。AHP1 と AHP2 の負荷配分に関しては Fig. 10 に示すように、同時に稼働している時間では概ね同負荷率での稼働となっている。これは、筆者のこれまでの研究¹⁹⁾によって、機器

Fig. 9 Optimal operation of HVAC system

Fig. 10 Partial load rate of AHP1 and AHP2

Fig. 11 Optimal operation of hot water system

特性が同じである熱源機器を同時に稼働させる場合、機器の容量に因らず同負荷率で稼働させることが最も省エネになると理論的に証明できおり、今回の複雑な最適化問題においてもその理論に従う形で最適化がなされていることを示している。

4.4 給湯システムの最適運用

給湯用熱源として想定した CGS 及び BB は、ガス主体の熱源である為、電気料金単価の差異の影響は一般電力系統や空調系統と比べると非常に小さい。しかし、Fig. 11 を見ると夜間に蓄熱し日中に放熱する傾向にあることがわかる。これは前述のポンプ動力など非常に小さい電力消費量であっても本研究の最適化手法において日中には稼働を抑えようと働いた結果と考えられる。7, 18, 19 時は電気料金単価が相対的に低い時間帯ではあるが、一般電力需要及び給湯需要が十分発生していることから CGS が稼働したほうがコストが安

くなると判断されたと考えられる。以上によって目的関数に与える影響が小さい要素も十分に最適化が可能になったことが明らかになった。

以上の計算は一般に販売されている PC (Windows 8.1 pro (64 bit), CPU Core i7-4700 (3.40 GHz), RAM 32 GB) において MATLAB R2014b を用いて解析した。解析に要した時間は 27 分程度であった。このように短時間での計算が可能ということは実システムに対しての適用が十分に可能であることを示している。

ϵ DE を含むメタヒューリスティクスは汎用性の高い探索性能を持つ一方で確率的探索であるため必ずしも毎回同じ解が得られるわけではない。しかし、 ϵ DE の探索性能を検討した文献¹⁰⁾によれば複数回計算においても良好な結果を示していることから信頼性が高い手法と言える。加えて、以上の考察により運用計画も妥当であるものと判断できる。従って、NP 困難である最適化問題に対して、十分妥当な解が短時間で得られることに ϵ DE の利点があると言える。

5. 多目的最適化

5.1 NDS の挙動解析とパレート最適解

本章では、一次エネルギー消費量(MJ/day)と運用コスト(yen/day)の 2 つを目的関数とし探索を行なう。個体数及び世代数は単目的最適化時と同じである。本研究で提案する ϵ MODE の探索性能を考察するために、本節では次の項目に注目する。

- 1) ϵ DE の作用： φ 及び ϵ の変化に見る制約条件の充足状況
- 2) MODEA の作用：NDS による FRank 別個体数の推移

Fig. 12 (a)には、 φ の最小値(Phi-min)及び ϵ (Epsilon)の変化と各目的関数値の最小値を示した。一次エネルギー消費量の最小値(PE-min)と運用コストの最小値(OC-min)に注目すると、探索開始すぐにやや減少し、Phi-min value が Epsilon value に合わせて減少するに伴って上昇に転じる。その後、1500 世代あたりから徐々に値を減少させ、4000 世代手前で実行可能解が見つかったのち、目的関数値も緩やかに減少する。これら一連の挙動は、次のように考察できる。まず前半世代では制約条件が満たされておらず、例えば過剰な蓄熱や放熱の下での運用コスト等を示しており、Phi-min 及び Epsilon の減少によって制約条件が満たされていくので、それに伴い目的関数値も上昇する。制約条件が満たされて以降は、目的関数値を最小化する方向に向かうため再びそれぞれの値が減少していく。

次に Fig. 12(b)には、各種個体数の変化を示した。実行可能解が出現するまで(Phi-min value > 0 の時)、制約逸脱度の許容値を超える個体($\varphi > \epsilon$ 個体と呼ぶ)数は 100 個体まで接近した後、1000 世代以降緩やかに減少し、4000 世代手前で実行可能解が出現すると急減する。その一方で実行可能個体数(Feasible)はアーカイブ個体も含めて 180 個体程度まで急増する。次に、実行可能個体が増加した後の挙動を考察する。ここでは、FRank が 1, 2, 3 に属する個体を示した。FRank1 は、つまりパレート解を構成する個体数を意味しているが、世代が進むにつれて FRank1 の数が最も多くなることがわかる。従って、パレート解を算出するにあたって、 ϵ MODE は十分に高い性能を有していると言える。Fig. 13 には最終的なパレート解を示した。多くの個体がある特定の点に集中することなく万遍なくパレート曲線を形成していることがわかる。

Fig. 12 Performance of ϵ MODE,
(a) Objective functions, (b) Number of individuals

Fig. 13 Pareto-front

5.2 最適運用の差異

Fig. 14 には、CGS の運用に関して、第 4 章で述べた運用コストを最小化する運用計画(Fig. 14(a))と、一次エネルギー消費量を最小化する運用計画(Fig. 14(b))を示す。運用コストを最小化するためには、電気料金単価が安い時間帯に電気主体機器を、高い時間帯にガス主体機器を稼働させることが望ましく、Fig. 14(a)ではそのような運用がなされている。また、CGS からの排熱は全て給湯需要に供給されている。一方で、Fig. 14(b)では、日中こそ全ての排熱が給湯需要へ供給されているが、深夜～早朝と夜間(21～23 時)にも CGS が稼働し、その排熱分は HRAR へも供給されている。HRAR への分配の理由として BB と HRAR の出力特性の関係性が挙げられる。Fig. 3 (a)に示した通り、BB は部分負荷率 20% を境に燃料消費特性が異なる。部分負荷率 20% 以下の場合、どの出力であっても燃料消費率が一定である為、BB の出力が 1kW 減少することによる一次エネルギー消費量の削減量は 0 である。

Fig. 14 Optimal operation of CGS, (a) Minimization of operating costs, (b) Minimization of primary energy consumption

Fig. 15 Partial load rate of BB
(Minimization of primary energy consumption)

一方で、HRARに1kWの排熱を供給した場合、本研究のモデルでは、外部条件で若干異なるが概ね3.5MJ抑制することが可能であるため、給湯需要ではなくHRARに排熱が供給されたと考えられる。また、7時には、CGSからの排熱がHRARと給湯需要の両方へ分配されているが、それも前述の通り、BBの特性曲線において出力20%時に特異点があることから出力を20%に保つための運用と言える。Fig.15には一次エネルギー消費量最小化時のBBの運用計画を示す。同時時間帯(0~7時)の部分負荷率が概ね20%で保たれていることがわかる。深夜時刻(21~23時)には給湯需要がBBの定格出力20%以下より少ないため、BBは低負荷率での運転をせざるを得なかったが、0~7時までの朝方は、給湯需要がBBの定格出力20%以上になっているため、実際には全てBBで補うことも可能である。しかし、BBの部分負荷率が20%以上の場合、本研究のモデルでは出力を1kW減少すると一次エネルギー消費量を5.75MJ削減することが出来る。先述のHRARへの1kW供給では3.5MJ程度の削減であるため、深夜~早朝はBBの出力を減らすためにCGSの排熱を給湯需要へ分配したほうがよいという選択に至ったと考察できる。

6. 総括

本研究では、近年導入が進むCGS及び、近年注目が集まり将来的な利活用が期待される蓄エネ設備を対象に、非線形モデリングにおいて効率的に制約条件を満たしつつ、目的関数値を最小化するための最適化手法(メタヒューリスティクス)を提案した。

まず前半部では、制約付き最適化手法として既往研究でその有効性が示されていた ϵ DEを適用し、PV、CGS及び熱源6台、更に、変数間依存性が高い蓄エネ設備を3つ導入した複雑なエネルギーシステムにおいて1日の運用コストを最小化するための単目的最適化

を行なった。ここでは、時刻毎に異なる電気料金という条件を活かし、蓄エネ・放エネ及び電力グリッドへの売電を計画し、更に稼働熱源の選択と負荷率の決定など幅広い項目を最適化した。また、一般的に想定される経験的な運用計画との比較も行なったところ、 ϵ DEによって得られた結果は5.7%改善しており、今回のような運用最適化問題に対して ϵ DEを適用する利点は十分にあると考えられる。

次に、後半部では、多目的最適化へ拡張するために、 ϵ DEの持つ制約条件処理能力を維持したまま、多目的最適化としてその有効性が示されていたMODEAと組み合わせた ϵ MODEを提案した。 ϵ MODEではその解析挙動を詳細に考察し、その探索性能を述べたのち、十分な多様性を持つパレート解が形成されることを明らかにした。また、CGSの最適運用を軸に目的関数の違いによる最適運用の差異に言及し、BBやHRAR等の熱源機との複雑な組み合わせ条件下において合理的な最適解を得ることが可能であることを明らかにした。

以上より、 ϵ DE及び ϵ MODEは、複雑なエネルギーシステムの最適化において、実際の時間内で十分妥当な解を得ることが可能であると言える。

今回の検討は発電量予測・負荷予測が外れない「完全予測型」を扱っており、実務においては翌日の運用計画策定時に利用できる手法である。一方で、当日の突発的な負荷変動への対応に関しては、制御方法等より具体的な方法論が更に必要であることから、今後の課題として検討すべき項目である。

謝辞

本論文を執筆するにあたって、東京ガス株式会社基盤技術基礎技術研究所熱流体チームの鍵屋慎一氏、湯浅りつ子氏に貴重なご意見を頂戴いたしました。心より感謝いたします。

略称一覧

- AR: Absorption refrigerator
- HRAR: Heat recovered absorption refrigerator
- AHP1: Air-source heat pump 1
- AHP2: Air-source heat pump 2
- CGS: Co-generation system
- BB: Backup boiler
- TES-C: Thermal energy storage for cooling demand
- TES-H: Thermal energy storage for hot water demand
- B: Battery
- RP: Real-time pricing
- PV: Photovoltaic device

参考文献

- 1) 伊東弘一: コージェネレーションの最適計画, 産業図書, 1990
- 2) 石田義洋ほか3名: 数値解析手法による複合熱源システムの機器運用の最適化, 空気調和・衛生工学会論文集, Vol.204, pp.35-45, 2014.3
- 3) G. Kayo et al.: Energy sharing and matching in different combinations of buildings, CHP capacities and operation strategy, Energy and Buildings, 82, pp.685-695, 2014
- 4) D. Buoro et al.: Optimization of a Distributed Cogeneration System with solar district heating, Applied Energy, 124, pp.298-308, 2014

- 5) T. Wakui et al. : Optimal structural design of residential cogeneration systems in consideration of their operating restrictions, *Energy*, 64, pp.719-733, 2014
- 6) 涌井徹也, 横山良平: 家庭用電熱源機器の最適機器構成計画支援ツールの開発(エネルギー需要量の変化を考慮した複数年最適機器構成計画), 第 31 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 10-3, pp.201-204, 2015.1
- 7) A.L. Facci et al. : Optimization of CHCP (combined heat power and cooling) systems operation strategy using dynamic programming, *Energy*, 66, pp.387-400, 2014
- 8) 池田伸太郎, 大岡龍三: メタヒューリスティクスを用いた蓄電池・蓄熱槽・熱源の統合的運用最適化手法の開発, 日本建築学会環境系論文集, Vol 79, No.705, pp.957-966, 2014.11
- 9) T. Takahama, S. Sakai : Constrained Optimization by the ε Constrained Differential Evolution with an Archive and Gradient-Based Mutation, *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp.1-9, 2010
- 10) R. Mallipeddi et al. : Efficient constraint handling for optimal reactive power dispatch problems, *Swarm and Evolutionary Computation*, 5, pp.28-36, 2012
- 11) M. Ali. et al. : An efficient Differential Evolution based algorithm for solving multi-objective optimization problems, *European Journal of Operational Research*, 217, pp.404-416, 2012
- 12) 空気調和・衛生工学会 : 都市ガスによるコージェネレーション評価プログラム : CASCADE III, 空気調和・衛生工学会, 2003.12
- 13) 国立天文台 : 理科年表 平成 24 年, 丸善出版, 2011.11
- 14) 国土交通省大臣官房官庁営繕部 : LCEM ツール Ver.3.10, 2014.2
- 15) 池田伸太郎, 長井達夫 : 遺伝的アルゴリズムとラグランジュの未定乗数法を用いた熱源の最適化手法と運用計画チャートの開発, 日本建築学会環境系論文集, Vol.78, No.691, pp.703-709, 2013.9
- 16) 東京ガス株式会社 : ガスコージェネレーションシステムカタログ, 2013
- 17) 建築環境・省エネルギー機構(IBEK) : BEST-P コージェネレーションシステム操作マニュアル, p.18, 2011.9
- 18) 秋元孝之ほか 6 名 : 外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 34) コージェネレーションシステムプログラムの概要, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, OS-22, pp.1137-1140, 2008.8
- 19) K. Deb et al. : A Fast and Elitist Multiobjective Genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol.6, No.2, 2002.4

DEVELOPMENT OF A METAHEURISTIC NONLINEAR MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION METHOD FOR OPERATING ENERGY SYSTEMS INCLUDING CGS AND ENERGY STORAGE SYSTEMS

Shintaro IKEDA^{} and Ryoza OOKA^{**}*

^{*} Ph.D. Student, Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo. JSPS Research Fellow

^{**} Prof., Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Ph.D.

Co-generation systems (CGS) and energy storage equipment, such as batteries and thermal energy storage (TES), have become increasingly important recently for improving energy efficiency and for peak loads of energy systems. In addition, some heat source machines have nonlinear characteristics due to the inverter techniques used for them. However, useful they may be, these innovations have made optimal operation of modern systems more difficult compared with previous energy systems. These problems involve three aspects. 1) The number of decision variables are increased, for instance, the recovered heat connections of CGS. 2) Economic power dispatch of each heat source machine calls for nonlinear optimization. 3) Optimization of the use of energy storage equipment is parameter dependent. Therefore, we aimed to obtain a more efficient optimization method that was also more accurate than previous methods. For this purpose, we applied ϵ DE (epsilon constrained differential evolution) for single objective optimization problem to minimize operating costs. Moreover, we proposed ϵ MODE (epsilon constrained multi-objective differential evolution) to solve the complex trade-off problem (e.g. operating costs vs primary energy consumption).

For the minimization of operating costs, ϵ DE uncovered that when the price of purchased electricity is higher than that of sold electricity, the electricity stored in batteries should be discharged and sold to the grid. On the other hand, battery power should be used to satisfy electric demand when the price of purchased electricity is lower than that of sold electricity. CGS were not operated at night and in early morning because, during those times, the operating costs of electrical machines (e.g., centrifugal refrigerator) was lower than that of the gasification machines (e.g., CGS). On the other hand, during the day time, CGS generated power and recovered heat was distributed not to a heat-recovered absorption refrigerator (HRAR) but to satisfy hot-water demand.

For the multi-objective optimization, ϵ MODE could carry out a lot of non-dominated solutions without concentrating on a certain position and generating dominated solutions. Although the CGS did not work at the night time and early morning to achieve optimal operation of CGS (in terms of minimization of operating costs), the CGS worked within each time interval, in terms of minimization of primary energy consumption. The reason is that the recovered heat was distributed to satisfy hot-water demand in order to provide a partial-load rate of 20% for the back-up boiler (BB) during early morning. This is because this partial load rate was the most efficient.

Therefore, ϵ DE and ϵ MODE could be used to carry out optimal solutions in practical amounts of time, even if the problem involved a lot of decision variables that were nonlinear.

(2015年6月7日原稿受理, 2015年10月14日採用決定)