

## MOEA/Dに基づく簡素なアナログ力学系の解析

KUNII, Yusuke / 國井, 裕介

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

61

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

4

(発行年 / Year)

2020-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00022830>

# MOEA/D に基づく 簡素なアナログ力学系の解析

## MOEA/D BASED ANALYSIS OF A SIMPLE ANALOG DYNAMICAL SYSTEM

國井裕介

Yusuke KUNII

指導教員 齋藤利通

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

This paper studies application of a multi-objective evolutionary algorithm to a trade-off problem in a switching power converter with photovoltaic input. The trade-off problem is considered in two objective functions of control parameters of the converter. The first function represents extraction of the maximum average power from the input. The second function represents stability of the periodic orbit of instantaneous input power. The third function represents efficiency. This is important to realize efficient renewable energy supply. In order to analyze the three-objective problem, we use a simple multi-objective evolutionary algorithm with the Tchebycheff approach and the crossover operator BLX- $\alpha$ . Applying the algorithm, we have obtained the Pareto front corresponding to the trade-off.

**Key Words** : MOEA/D, boost converter, photovoltaic

### 1. はじめに

本研究では光電入力昇圧コンバータのトレードオフ問題への多目的進化型アルゴリズム[1]の応用について考える。

光電入力昇圧コンバータは重要な再生可能エネルギー供給システムである。回路の動作は制御パラメータを含む区分線系微分方程式で記述される。効率の良いエネルギー供給を実現するためには、最大電力点、安定性、効率の3つの問題を考慮する必要がある。これらの問題は、非線形回路とシステムの分野で考えられてきた。しかし、以前の研究では3つの目的のトレードオフについて考慮されていない。この3目的問題をより詳細に解析することで、効率の良い再生可能エネルギーの供給を実現するための基礎的で重要な情報を与えることになる。この3目的問題を考える上で、本研究では解析を簡単にするために、太陽光入力を区分線系モデルを用い、簡素な MOEA/D を使用した。区分線系モデルの動作は厳密解により計算できる。MOEA/D は多目的問題に対する最も効率的なアルゴリズムの1つとして知られている。アルゴリズムのパフォーマンスは多目的 0-1 ナップザック問題などのベンチマーク問題で研究されてきた。本研究ではチェビシェフアプローチと BLX- $\alpha$  を使った3目的問題に対する簡素な MOEA/D を提案する。[2]

### 2. 回路モデルと目的関数

光電入力昇圧コンバータの回路モデルを図1に示す。解析を簡単にするために時定数  $RC$  がクロック周期の  $T$  よりも十分大きいものと仮定し、負荷  $RC$  を定電圧源  $V_o$  に置換える。また、太陽電池入力を2領域区分線系電流制御電圧源(CCVS)に置換える。[3]CCVS の特性を以下に示す。

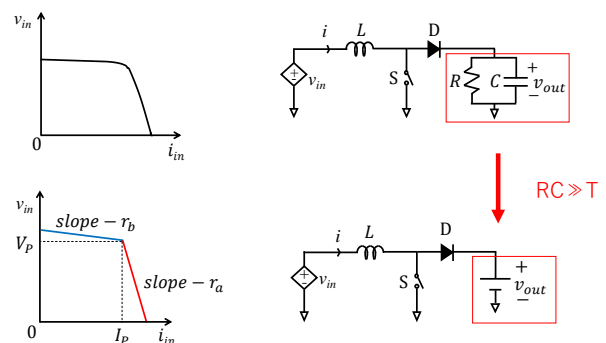


図1 回路モデル

$$v_{in}(i_{in}) = \begin{cases} -r_{\alpha}(i_{in} - I_p) + V_p & \text{for } i \leq I_p \\ -r_{\beta}(i_{in} - I_p) + V_p & \text{for } i > I_p \end{cases} \quad (1)$$

コンバータはスイッチ  $S$  とダイオード  $D$  を含み、次の2つの状態のいずれかをとるものとする。

State1: スイッチ ON, ダイオード OFF

State2: スイッチ OFF, ダイオード ON

スイッチングルールは以下のように定義される.

$$\begin{cases} \text{State1} \rightarrow \text{State2} & \text{if } t = nT \\ \text{State2} \rightarrow \text{State1} & \text{if } i_{in} = J_- \end{cases}$$

ただし,  $n$  は自然数,  $J_-$  はしきい値である. 図 2 にスイッチングルールを示す. 回路の動作は次式で記述される.

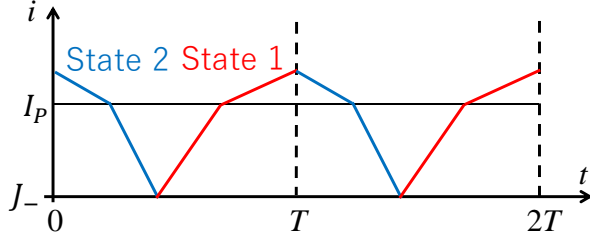


図 2 スイッチングルール

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \begin{cases} \gamma y(x) & \text{for State1} \\ \gamma(y(x) - q) & \text{for State2} \end{cases} \\ y(x) &= \begin{cases} -\alpha(x-1) + 1 & \text{for } x \leq 1 \\ -\beta(x-1) + 1 & \text{for } x > 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

スイッチングルール(図 2 参照)

$$\begin{cases} \text{State1} \rightarrow \text{State2} & \text{if } \tau = n \\ \text{State2} \rightarrow \text{State1} & \text{if } x_j = X_- \end{cases}$$

ただし, 以下の無次元化定数とパラメータを用いた.

$$\begin{aligned} \tau = \frac{t}{T}, x = \frac{i_{in}}{I_p}, y(x) = \frac{v_{in}(I_p x)}{V_p}, \alpha = \frac{r_\alpha I_p}{V_p}, \beta = \frac{r_\beta I_p}{V_p} \\ q = \frac{V_{out}}{V_p}, \gamma = \frac{TV_p}{LI_p}, X_- = \frac{J_-}{I_p} \end{aligned}$$

簡単のため,  $\alpha = 0.1, \beta = 0.5, q = 1.6$  と固定し,  $\gamma$  と  $X_-$  を制御パラメータとする  $d = (\gamma, X_-)$ . 回路モデルは区分線系なので, 区分線系厳密解を用いて解析できる. 安定性を以下のように特徴づける:

$$|DF(p)| = \frac{|\Delta x_1|}{|\Delta x_0|} \quad (3)$$

ただし,  $p$  は対象とする周期 1 の軌道を与える初期値であり,  $F$  は初期値と 1 周期後の値を関係づける写像である. 平均電力を以下のように特徴づける:

$$P_A = \int_0^1 p_{in}(\tau) d\tau, p_{in}(\tau) = x(\tau)y(\tau) \quad (4)$$

リップルを以下のように特徴づける:

$$RP = \max(x(\tau)) - \min(x(\tau)) \quad \text{for } 0 \leq \tau < 1 \quad (5)$$

トレードオフを考えるために目的関数を 3 つ導入する.

$$\begin{aligned} f_1(\gamma, X_-) &= |DF(p)|/N_1 \\ f_2(\gamma, X_-) &= RP \times N_2 \\ f_3(\gamma, X_-) &= N_3 - P_A \end{aligned} \quad (6)$$

ただし,  $N_1, N_2, N_3$  は正規化定数である. 3 つの目的関数は厳密解から計算することができ, 最小化を目的としている関数である.

### 3. 2 目的問題の MOEA/D アルゴリズム

2 目的問題は全探索でも解くことが可能だが, 次元数が増えると計算が不可能になってしまう. 本論文では, 目的関数  $f_1, f_2$  の 2 目的問題に簡素な MOEA/D を適用する. MOEA/D は重み付きベクトルを使用することで, 2 目的問題を単一目的副問題へ分化して解析する. 重み付きベクトルは以下の様に与えられる.

$$\begin{aligned} \lambda^j &= (\lambda_1^j, \lambda_2^j), \lambda_1^j + \lambda_2^j = 1 \\ \lambda_1^j &= \frac{j}{H}, j \in \{0, 1, \dots, H\} \end{aligned} \quad (7)$$

ただし,  $H$  は分割数である. MOEA/D にはいくつかのスカラー適応度関数があるが, 今回はチェビシェフアプローチを使用した. この方法では参照点  $z^*$  を使用する. 参照点  $z^*$  は以下のように定義される.

$$z^* = (z_1^*, z_2^*)$$

ただし,  $z_i^*$  は  $f_i(d)$  の最小値である. ここで, チェビシェフアプローチのスカラー適応度関数は以下の様に表される.

$$\begin{aligned} h^j(d|\lambda^j, z^*) &= \max\{h_1^j, h_2^j\} \\ h_1^j(d|\lambda_1^j, z_1^*) &= \lambda_1^j |f_1(d) - z_1^*| \\ h_2^j(d|\lambda_2^j, z_2^*) &= \lambda_2^j |f_2(d) - z_2^*| \end{aligned} \quad (8)$$

アルゴリズムはスカラー適応度関数を最小化する.  $d_p$  が他のどの解にも支配されないとき,  $d_p$  はパレート最適解である. 関数平面上でのパレート最適解の集合をパレートフロントという. MOEA/D のアルゴリズムを以下に記述する.

#### Step1(初期化)

外部個体群の初期化をする. 重み付きベクトルと初期個体を生成する. 参照点を更新する.

#### Step2(更新)

$d^j$  の近傍ベクトルからランダムに親個体を選択する. 遺伝的操作を行い子個体を生成する. ただし, 遺伝的操作では BLX- $\alpha$  を使用した. [4]参照点の更新を行う. 外部個体群を更新する. 子個体に優越されている外部個体群を全て除去し, 外部個体群に優越されていない子個体を外部個体群に追加する.

Step3(終了条件)

世代数  $g \leftarrow g + 1$  として,最終世代数  $g_{max}$  になるまで繰り返す.

図 3 に目的関数  $f_1, f_2$  の MOEA/D の進化過程を示す.

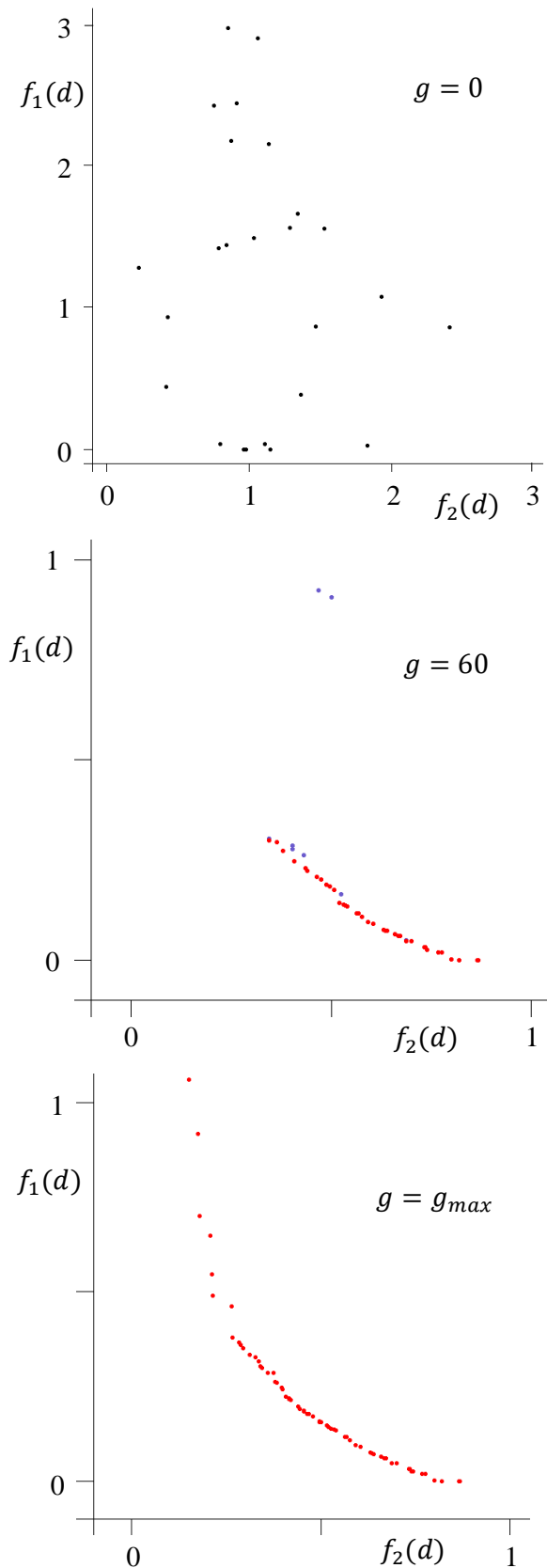


図 3 MOEA/D 進化過程

同様のアルゴリズムを目的関数  $(f_2, f_3), (f_1, f_3)$  に適用する.

図 4 に目的関数  $(f_2, f_3)$  平面, 図 5 に目的関数  $(f_1, f_3)$  平面の MOEA/D 最終世代を示す.

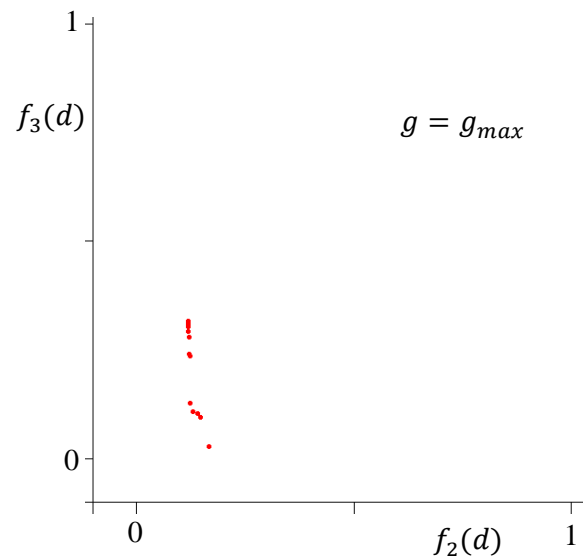


図 4 目的関数  $(f_2, f_3)$  平面でのトレードオフ

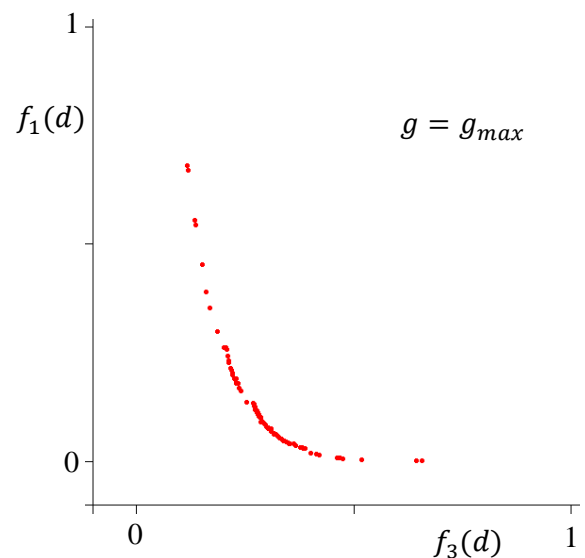


図 5 目的関数  $(f_1, f_3)$  平面でのトレードオフ

ただし,多目的進化型アルゴリズムで使用したパラメータを以下に示す.

$$H = 29, N = 30, g_{max} = 100, N_1 = 2, N_2 = 4, N_3 = 1.1$$

#### 4. むすび

光電入力昇圧コンバータの 2 目的問題のトレードオフについて考察を行った.はじめに,光電入力昇圧コンバータの基本動作について考察した.区分線系厳密解を用いることで,現象を厳密に解析することができた.2 目的問題に

簡素な2目的進化型アルゴリズムを適用することで(安定性,リップル),(安定性,平均電力),(リップル,平均電力)のそれぞれにトレードオフの関係があることを明らかにした.

このトレードオフ関係をより詳細に解析することで,再生可能エネルギーから効率に安定して最大電力を取り出すための基礎的で重要な情報を与えることになると考えられる.

#### 参考文献

1) Q. Zhang and L. Hui, MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition, IEEE Trans. Evol. Comput., 11, 6, pp. 712-731, 2007.

2) T. Togawa, Y. Kunii, S. Yasukawa and T. Saito, Application of MOEA/D to a trade-off problem between maximum power point and stability, Proc. IEEE/CEC, 2019.

3) H. Matsushita and T. Saito, Application of particle swarm optimization to parameter search in dynamical systems, NOLTA, IEICE, 2, 10, pp. 458-471, 2011.

4) L. J. Eshelman and J. D. Schaffer, Foundations of Genetic Algorithms 2, (1993)187-202.