

パレートフロントに基づく非線形回路のパラメータ次元圧縮へのアプローチ

著者	藤川 龍太郎
出版者	法政大学大学院理工学・工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編
巻	63
ページ	1-4
発行年	2022-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00025349

パレートフロントに基づく非線形回路の パラメータ次元圧縮へのアプローチ

An approach toward pareto front based dimensionality
reduction of parameters in nonlinear circuits

藤川 龍太郎

Ryutaro Fujikawa

指導教員 斎藤利通

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専修士課程

In this thesis, we consider dimensionality reduction of parameters in a piecewise linear model of boost converter with PV input. The circuit is subject to a bi-objective optimization problem where the first and second objectives evaluate efficiency of input power and stability of periodic orbits, respectively. A trade off exists between the two objectives and is represented by a Pareto front. An approximation of the Pareto front is a criterion for the dimensionality reduction. Performing precise numerical experiment, a simple dimensionality reduction from two-dimensional parameter space into a one-dimensional parameter subspace is achieved.

Key Words : dimensionality reduction, multiobjective optimization, renewable energy.

1. はじめに

多目的最適問題は、スイッチングパワーコンバータを含む、さまざまなシステムで考えられている。この問題は、複数の目的を同時に最適化する必要がある。ここでは、トレードオフの解析が重要である。トレードオフとは、1つの目的が良くなると、もう1つの目的が悪くなる関係をいう。トレードオフの存在を示すパレートフロントを求めるために、効率的な多目的進化アルゴリズムが研究されている。

本論の、多目的最適化の対象は、光電入力昇圧コンバータである。この回路は、再生可能エネルギー供給における基礎的な回路である[1]。この回路動作は、効率的に光電(PV入力)から電力を取り出すものである。また、回路動作は最大電力点追従(MPPT)の技術に広く応用される。多目的最適化問題を考える上で、適切なパラメータチューニングは必要である。しかし、この回路は複数のパラメータを含むため、それらのパラメータチューニングは簡単ではない。効率的なパラメータ次元圧縮を考える必要がある。

パラメータ次元圧縮、最初のステップとして、区分線形モデル光電入力昇圧コンバータの2目的最適化問題を考える。1つ目の目的関数は、入力電力を取り出す効率を評価する。2つ目の目的関数は、この回路の周期軌道の安定性を評価する。この回路は厳密解による解析が可能であるため、それぞれの目的関数を正確に計算できる[2][3]。

2目的最適化問題を考える中で、Parameter spaceにおける、2次元パラメータ空間から1次元パラメータ空間への簡素な次元圧縮を考える。また、次元圧縮を評価するための基準として、パレートフロントの近似を考える。近似の評価については、Hypervolume (HV) 指標を用いる。

典型的な例の精密な数値解析を行うことで、最も評価の良いパレートフロントの近似が得られ、簡素なパラメータ次元圧縮を成功させた。この結果は、様々な非線形回路やシステムにおいて、効率的な次元圧縮方法を発展させるための、基礎的で重大な情報を与えることにつながる。

2. 本論

(1) 回路モデル

図1(a)は区分線形モデル光電入力昇圧コンバータの回路モデルを示している[1]。図1(b)で示した、光電入力は、2セグメントの区分線形によって簡素化されている。この回路の目的は、最大入力電力を取り出し、インダクタ電流軌道の安定性である。スイッチSとダイオードDはそれぞれ2つの状態をとる。

State1 S:ON, D:OFF, State2 S:OFF, D:ON

次に、スイッチングルールは $t = nT$ のとき State1 から State2 に切り替わり、 $i_L = I_L$ のとき、State2 から State1 に切り替わる。

次に、回路動作は以下の式で表すことができる。

$$L \frac{di_1}{dt} = \begin{cases} v_1 \\ v_1 - V_o \end{cases} \quad (2.1)$$

$$v_1 = \begin{cases} -r_a(i_1 - I_p) + V_p & \text{for } 0 < i_1 < I_p \\ -r_a(i_1 - I_p) + V_p & \text{for } I_p < i_1 \end{cases} \quad (2.2)$$

無次元化変数とパラメータは次のものを用いる。
 $\tau = \frac{V_p i}{L I_p}$, $x = \frac{i_1}{I_p}$, $y = \frac{v_1}{V_p}$, $q = \frac{V_o}{V_p}$, $X_- = \frac{I_-}{I_p}$, $\alpha = \frac{r_a I_p}{V_p}$, $\beta = \frac{r_b I_p}{V_p}$, $T_p = \frac{V_p T}{L I_p}$. よって, (2.1)式(2.2)式はそれぞれ以下のよう示される.

$$\frac{dx}{dt} = \begin{cases} y(x) \\ y(x) - q \end{cases} \quad (2.3)$$

$$y(x) = \begin{cases} -\alpha(x-1) + 1 & \text{for } 0 < x < 1 \\ -\beta(x-1) + 1 & \text{for } 1 < x \end{cases} \quad (2.4)$$

ただし, CCVS は $0 < \alpha < 1 < \beta$ として考える. 瞬時電力 $p_{in}(\tau) = x(\tau)y(\tau)$ によって与えられる. ここで, 重大な問題は, 回路を制御するパラメータが 5 つ存在することである. このパラメータの次元圧縮ことは重要であるが, 簡単ではない. 本論では, パラメータの次元圧縮の最初のステップとして, 2次元パラメータ空間 $d = (T_p, X_-)$ を 1次元パラメータ空間に圧縮することを考える. また, 他のパラメータ $(\alpha, \beta, q) = (0.25, 5, 1.6)$ とする. この回路はパラメータに依存して, 様々な非線形現象を呈する[3]. 本論では, 解析を簡素化するために, 1周期軌道に着目した. 周期 T_p の波形を図 1(c)に示す.

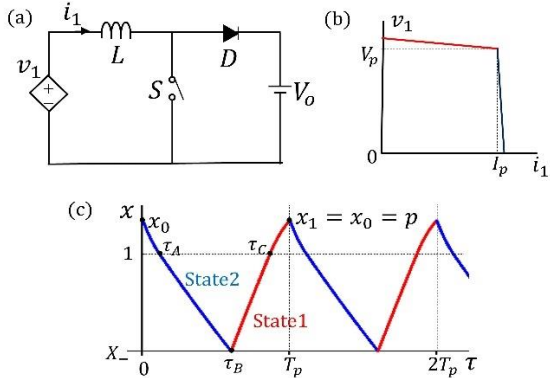


図 1 区分線形モデル昇圧コンバータ. (a)回路モデル. (b)PV 入力 CCVS モデル. (c)周期波形.

厳密解を計算することにより, 周期軌道を計算できる. $x_0 = x_1 = p$ として不動点が示され, $|Df(p)| = \left| \frac{x_1}{x_0} \right|$ は周期軌道の拡大率を示し, これも厳密に計算できる. 典型的な電流波形と瞬時電力波形を以下に図 2 として示す. $|Df(p)| < 1$ のとき, 周期軌道は安定となる.

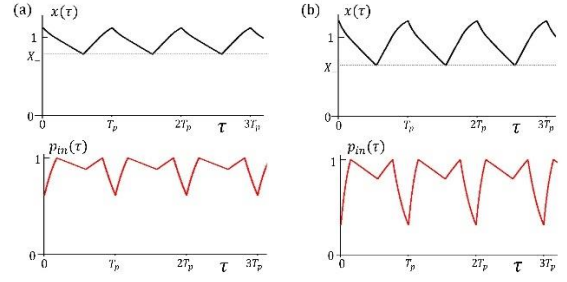


図 2 典型的な波形.

(2) 多目的最適化問題と次元圧縮

2 目的最適化問題を考えるために, 2 つの目的関数を定義する.

$$F_1(d) = 1 - P_A \quad (2.5)$$

$$F_2(d) = |Df(p)| \quad (2.6)$$

ただし, $P_A \equiv \int_0^{T_p} p_{in}(\tau) d\tau$ であり, 平均電力を示す. また, パラメータは, $d = (T_p, X_-)$ である. $F_1(d)$ は PV 入力からの電力抽出を評価していて, 0 に近づくと, 平均電力は大きくなる. $F_2(d)$ は周期軌道の拡大率を表していて, 0 に近づくと, 周期軌道の安定性は強くなる. 厳密解を計算することで, $F_1(d)$, $F_2(d)$ は正確に計算できる. この 2 つの目的関数を同時に最適化する.

$$\text{Minimize } F(d) = (F_1(d), F_2(d)) \in S_o \quad (2.7)$$

$$\text{subject to } d = (T_p, X_-) \in S_d$$

ただし, $S_o = \{F_1(d), F_2(d) | 0 < F_1(d) < 0.5, 0 < F_2(d) < 1\}$, $S_p = \{T_p, X_- | 0 < T_p < 3, 0 < X_- < 1\}$ である. また, S_o は目的空間, S_p はパラメータ空間を表す.

次に支配関係の図 3 として, 以下に示す.

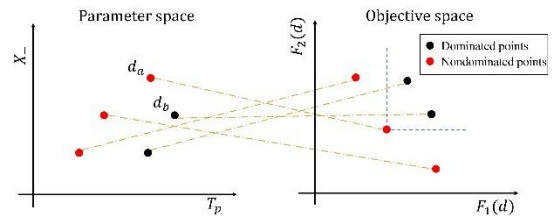


図 3 支配関係

以下の式を満たすとき, パラメータ d_a はパラメータ d_b を支配しているという.

$$\begin{aligned} A : & F_1(d_a) < F_1(d_b) \text{ and } F_2(d_a) < F_2(d_b) \\ B : & F_1(d_a) < F_1(d_b) \text{ and } F_2(d_a) = F_2(d_b) \\ C : & F_1(d_a) = F_1(d_b) \text{ and } F_2(d_a) < F_2(d_b) \end{aligned} \quad (2.8)$$

もし, d_p がどのパラメータからも支配されていない場合, d_p はパレート最適解という. パレート最適解の集合をパレートセット (Pareto set) といい, それに対応する目的

空間の解をパレートフロント(Pareto front)という。簡単のため、パレートセットを PS, パレートフロントを PF と呼ぶことにする。PS と PF が示されれば、2つの目的関数の間にはトレードオフが存在することを示す。以下に、図4として、(2.7)式を解析した2目的最適化問題の結果を示す。

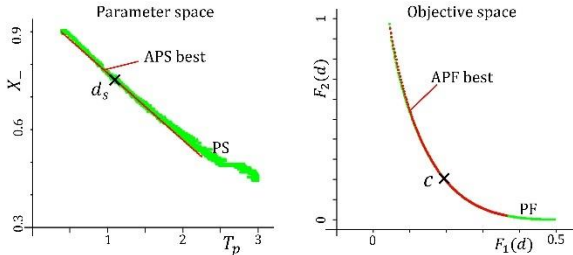


図4 2目的最適化問題の結果とパラメータ次元圧縮。

本論の重大な問題は、2次元パラメータ空間 S_p から1次元パラメータ空間への次元圧縮を考えることである。ここからは、次元圧縮方法を示す。

はじめに、PF上に基準点 c を定義する。これはPF上の最も原点に近い点である。この基準点 c に対応するPS上の点を d_c とする。 $c = (F_1(d_c), F_2(d_c))$ である。 d_c はPS内の中心点というイメージである。次に、PS内で、 d_c を通る傾き θ に等しい線分を設定する。この近似パレートセットであり、APSと呼ぶ。 θ を変化させることで、PF近似精度も変わってくる。APSはPS内に含まれているため、その写像はPFにも含まれる。つまり、PFの部分集合となる。それは近似パレートフロントであり、APFと呼ぶ。後に評価されるPFの最も良い近似を与えるAPS (best APS)を見つけることができれば、2次元パラメータ空間PSが1次元パラメータ空間best APSにパラメータ次元圧縮が成功されたことになる。(best APSは主成分分析の第1主成分に一致していると考えると想像しやすい。)

次にPFの近似を評価するために、Hypervolume指標[4]を導入する。PF上で、 $F_1(d)$ の最悪値を r_1 、 $F_2(d)$ の最悪値を r_2 とする。参照点 $r \equiv (r_1, r_2)$ とする。 b_1, b_2 はPF上の終了点とする。 a_1, a_2 はAPF上の終了点とする。次に3つの指標を定義する。

$H(\theta)$: APSのHypervolume指標。 a_1 と r の間の線分、 a_2 と r の間の線分、APFによって囲まれた面積。

H_c : PSのHypervolume指標。 b_1 と r の間の線分、 b_2 と r の間の線分、PFによって囲まれた面積。

$$h(\theta) = \frac{H(\theta)}{H_c} : \text{APSの正規化されたHypervolume指標。}$$

以上のことを図5として以下に示した。

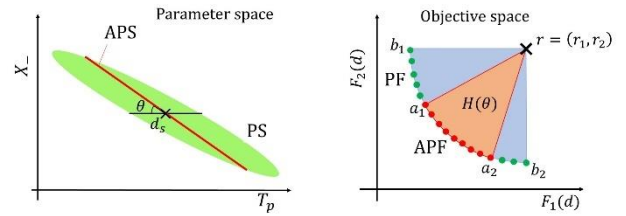


図5 パレートフロントの近似と評価。

$h(\theta)$ はAPSの評価に用いられる。 $h(\theta)$ が大きくなると、APSの近似精度は良くなる。図6に示したのは、 θ に対応する、 $h(\theta)$ の近似特性である。ここで示されたのは、 $h(\theta)$ が最大となるAPSが存在している。図4には $\theta = \theta_m$ のときのAPSとAPFを示した。このときbest APSが与えられた。これは、すなわち、2次元パラメータ空間PSから1次元パラメータ空間best APSにパラメータ次元圧縮が成されたことを示した。

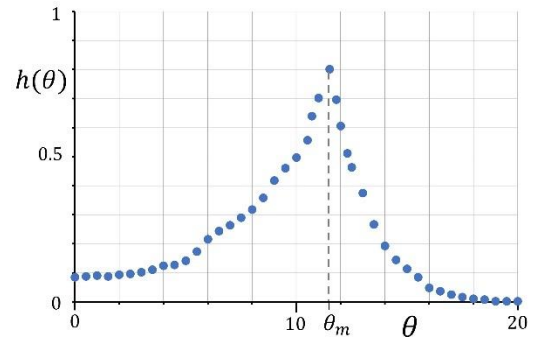


図6 Hypervolume指標による近似特性。

3. むすび

本章では、区分線形モデル光電入力昇圧コンバータにおける簡素なパラメータ次元圧縮について考えた。2目的最適化問題については、入力電力の効率性と回路動作の安定性の間にパレートフロントで示されるトレードオフが存在した。パラメータ次元圧縮について考える上で、基準としてパレートフロントの近似を使った。Hypervolume指標を導入することで、APFを評価した。精密な数値解析を行うことで、最も評価のよりbest APFを得た。このことにより、2次元パラメータ空間から1次元パラメータ空間への次元圧縮が成功したことを示した。

今後の展望として、さまざまなパレートフロントの近似を評価する指標を考えることや、高次元パラメータ空間を効率よく次元圧縮できる方法を考えることや、さまざまな非線形回路やシステムへの応用が挙げられる。

謝辞：本修士論文は著者が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において非線形回路工学研究室にて行った研究をまとめたものである。この研究は同専攻 斎藤利通教授の指導下で行ったもので、同研究室で3年間研究活動を遂行するにあたり大変御参考になる御指導・御鞭撻を沢山賜りました。ここに心から深く感謝致します。法政大学理工学部電気電子工学科斎藤利通研究室の皆様にはいろいろな有益なご討論・ご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) D. Kimura and T. Saito, A trade-off between the maximum power point and stability, IEICE Trans. Fundam. E94-A, 7, pp.1513-1518, 2011.
- 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, pp. 3222-3227, 2019.
- 3) R. Fujikawa, T. Togawa, and T. Saito, Analysis of switched dynamical systems in perspective of bifurcation and multiobjective optimization, IEICE Trans. Fundam. E104-A, 2, 2021.
- 4) H. Ishibuchi, R. Imada, N. Masuyama and Y. Nojima, Comparison of Hypervolume, IGD and IGD+ from the viewpoint of optimal distributions of solutions, K. Deb et al. (Eds.): EMO 2019, LNCS 11411, pp. 332-345, 2019.