

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

並列化スイッチングコンバータの安定性とリップル特性

著者	安藤 海斗
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編
巻	59
ページ	1-4
発行年	2018-03-31
URL	http://doi.org/10.15002/00021549

並列化スイッチングコンバータの安定性とリップル特性

STABILITY AND RIPPLE CHARACTERISTICS OF PARALLELED BOOST CONVERTERS

安藤 海斗

Kaito ANDO

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攻修士課程

This paper studies basic dynamics of a coupled system of boost converters. The converters are coupled by current-threshold and Winner-Take-All(WTA) switching rules. This WTA switching rule can realize multi-phase synchronization automatically. The WTA switching rule is effective to reinforce the fault tolerance. It is suitable for current sharing and ripple reduction. Simplifying the system into a piecewise linear model, stability of the synchronization phenomena and fault tolerance can be analyzed precisely.

Key Words : *Paralleled boost converter, Stability, Ripple, Fault tolerance*

1. はじめに

スイッチング電源の1つであるDC-DCコンバータは、パワーエレクトロニクス分野において重要な基本回路である。DC-DCコンバータはスイッチとダイオードを含む回路であり、それらのONとOFFの切り替えを制御することで、直流電圧を所望の直流電圧に変換する。この回路はスイッチトダイナミカルシステム(Switched Dynamical System)であるため、基礎から応用まで広く研究が行われている[1]-[3]。また、DC-DCコンバータは昇圧コンバータを用いる。昇圧コンバータは入力電圧を高い出力電圧に変換し、昇圧コンバータが光電変換素子によって与えられる場合のMaximum Power Point Tracking(MPPT)技術にも関係している。また、効率や入力に対する応答特性に関する研究も行われている[4]。

並列化DC-DCコンバータは重要なエネルギー供給系であり、基礎と応用の観点から研究されている。並列化DC-DCコンバータは複数のDC-DCコンバータを並列に接続して電力変換を行う。その機能の1つとして、各コンバータの入力電流を分担するCurrent Sharingがある。それによって集積回路技術等で重要な低電圧大電流供給ができる。また、信頼性・故障耐性の向上を実現することが可能である。

一方、並列化DC-DCコンバータは高次元の非線形スイッチ力学系の一つである。スイッチルールに依存して、N相同期現象(N-SYN)やカオスなどの様々な非線形現象を呈する。このような非線形現象を解析することは重要な基本問題である。

本論文では、N個の昇圧コンバータを並列に結合した並列化昇圧コンバータについて考察する。N個の昇圧コンバータはWTAスイッチルールによって結合されており、N相同期現象を自動的に達成することができる[5]-[7]。N-SYNは入力電流のリップルの低減に適しており、これによって高効率化が図れる。また、並列動作は故障耐性の観点からも適している。もし、一部のコンバータが故障している場合、他のコンバータが動作を保つことができる。

このN-SYNの安定性と故障耐性を解析する。解析には、コンバータの負荷を定電圧源と置き換えた区分線形モデルを導入し、N-SYNの安定性のためのパラメータの十分条件を与える。無次元化パラメータを導入して、系を状態方程式で記述する。この方程式を区分的厳密解による精密な数値実験で解析を行う。まず、N-SYNの安定性と出力電圧などに関連するパラメータとの関係を明らかにする。次に、入力電流のリップルに関する特徴量を定義し、リップルとパラメータの関係を明らかにする。リップルを低減できれば電力変換効率の向上が可能となる。それに伴い故障耐性の解析も行う。本論文の結果は並列化昇圧コンバータを効率よく安定に動作させるための基本情報を与える。

2. 並列化DC-DCコンバータ

並列化昇圧コンバータの区分線形回路モデルを図1に示す。 j 番目のコンバータ($j = 1 \sim 3$)は、スイッチ S_j とダイオード D_j を含み、以下のいずれかの状態をとるものとする。

$$\begin{aligned} \text{State A: } & S_j \text{ ON, } D_j \text{ OFF,} \\ \text{State B: } & S_j \text{ OFF, } D_j \text{ ON.} \end{aligned} \quad (1)$$

スイッチの制御のため、系は周期 T のクロックをもつものとする。 j 番目のコンバータはState Aにあるときは、 $t = nT$ でインダクタ電流 i_j が最大であればState Bに切り替わる。また、State Bにあるときは、 i_j が下しきい値 J_- に達すると、State Aに切り替わる(図2参照)。このWTAスイッチによってコンバータは結合されている。

$$\text{SW} \begin{cases} \text{State A} \rightarrow \text{State B} & \text{if } i_j = \text{Max} (t = nT) \\ \text{State B} \rightarrow \text{State A} & \text{if } i_j = J_- \end{cases} \quad (2)$$

簡単にするために、 $RC \gg T$ と仮定し、負荷を定電圧源 V_{o_j} に置き換える。このとき、回路の動作は次式で記述される。

$$L \frac{di_j}{dt} = \begin{cases} -r_L i_j + V_{in} & \text{for State A} \\ -r_L i_j + V_{in} - V_{o_j} & \text{for State B} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、以下の無次元化変数とパラメータを導入する。

$$a_j = \frac{TV_{in}}{LJ}, \quad b_j = \frac{T(V_{oj} - V_{in})}{LJ}, \quad c_j = \frac{Tr_L}{L} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{t}{T}, \quad x_j = \frac{i_j}{J}, \quad X_- = \frac{J_-}{J}$$

ただし T はクロック周期、 $J(> 0)$ はダイナミックレンジを決める基準電流である。簡単のため、 $a_j = a = 0.3, c_j = c = 0.3$ と固定しパラメータ b_j を変化させるとコンバータの電流波形がどのように変化するかについて見ていく。この無次元化変数とパラメータを用いて無次元化した無次元化方程式とその初期値 $(\tau, x) = (\tau_0, x_0)$ に対する区分的厳密解は以下ようになる。

$$\frac{dx_j}{d\tau} = \begin{cases} -cx_j + a & \text{for State A} \\ -cx_j - b_j & \text{for State B} \end{cases} \quad (5)$$

$$x_j(\tau) = \begin{cases} (x(0) - a/c)e^{-c\tau} + a/c & \text{for State A} \\ (x(0) + b_j/c)e^{-c\tau} - b_j/c & \text{for State B} \end{cases} \quad (6)$$

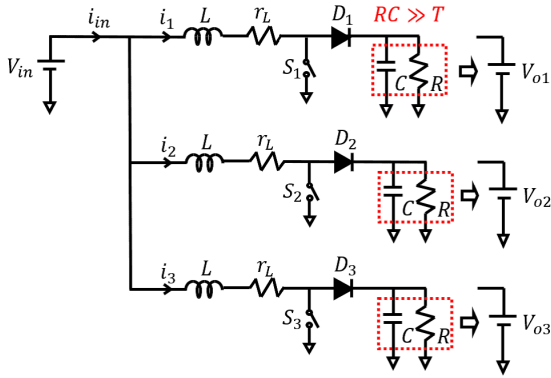


図 1 並列化昇圧コンバータの回路モデル

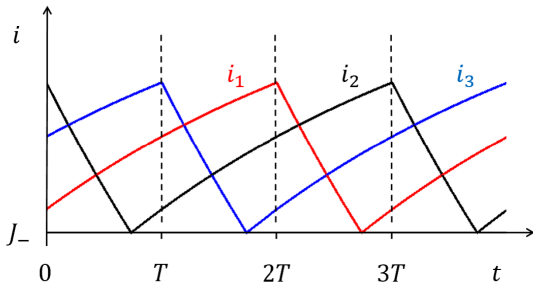


図 2 WTA スイッチルール ($N = 3$)

3. 安定性とリップル量の特徴量

$x = (x_1, \dots, x_N)$ とする。 $x(\tau)$ が周期 $N(x(\tau + N) = x(\tau))$ で、 $x(\tau)$ が 1 周期に 1 度だけ StateA から StateB に切り替わるとき、 x は N-SYN であるという。

N-SYN となる x を x_p とすると、 $x(0) = x_p(0) + \Delta x(0)$ に対して x が $x_p(\tau)$ に収束するとき、N-SYN は初期値に対して安定であるという。初期値 x_p の 1 つの成分を x_f とする。 $\tau = 0$ での x と $\tau = N$ での x を関連づける写像を $x(N) = F(x(0))$ とする。 x_f は F の不動点であり、 x_f は N-SYN に対応する。 x_f は以下の式で与えられる。

$$x_f = \frac{P_1 - \frac{P_1 - X_-}{P_2 + X_-} e^{-cN} P_2}{1 + \frac{P_1 - X_-}{P_2 + X_-} e^{-cN}}, \quad P_1 = \frac{a}{c}, \quad P_2 = \frac{b_j}{c} \quad (7)$$

N-SYN は、以下の条件がなりたつときに安定となることがわかる [6]。

$$|DF(x_f)| < 1, \quad DF(x_f) = \frac{X_- - \frac{a}{c} e^{-cN}}{X_- + \frac{b}{c}} \quad (8)$$

N-SYN における $x(\tau)$ のリップル量を次のように定義する (図 3 参照)。

$$R_p = \max(x(\tau)) - \min(x(\tau)) \quad \text{for } 0 < \tau < N \quad (9)$$

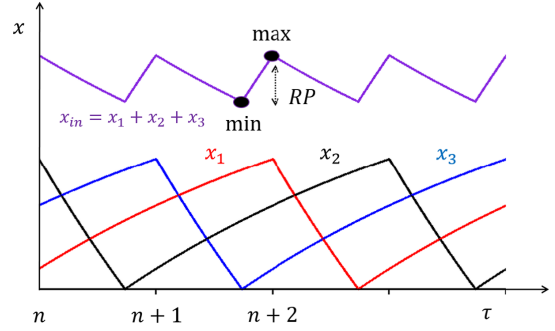


図 3 リップル量 ($N = 3$)

4. 故障耐性

ここでは、3-SYN が安定の場合に事故が発生し、3 つ目のコンバータが故障したと仮定する。それにより、3 つのコンバータの系は 2 つのコンバータの系に変更されている。簡単のため、 $N = 3$ で解析を行う。図 4 に故障前の 3-SYN の電流波形と故障後の 2-SYN の電流波形を示す ($b_1 = b_2 = b_3$)。図 5 に故障前の 3-SYN の電流波形と故障後の 2-SYN の電流波形を示す ($b_1 = b_2 \neq b_3$)。図 6 に $b_1 = b_2 = b_3$ でのリップル特性を示す。図 7 に $b_1 = b_2 \neq b_3$ でのリップル特性を示す。図 4 (a) は故障前の安定した 3-SYN の波形であり、図 4 (a') は、故障後の安定した 2-SYN の波形である。図 4 (b) は故障前の安定した 3-SYN の波形であり、図 4 (b') は故障後の安定した 2-SYN の波形である。図 4(a') では、故障後のリップルが減少していることがわかる。図 5 は、 b_3 が様々な場合の同様の結果を示す。図 6(a) は $b_1 = b_2 = b_3$ での故障前の 3-SYN のリップル特性であり、図 6(b) は故障後の 2-SYN のリップル特性である。図 7(a) は $b_1 = b_2 \neq b_3$ での故障前の 3-SYN のリップル特性であり、図 7(b) は故障後の 2-SYN のリップル特性である。パラメータによっては故障前よりも故障後のほうがリップルが減少しているパラメータがあると見てわかる。

5. むすび

簡略化した並列化昇圧コンバータの区分線形モデルを導入した。本論文では、N-SYN の安定性と故障耐性について考察した。いくつかのパラメータの範囲では、故障した後でも WTA スイッチルールによって N-SYN を維持できることを確認した。また、パラメータによっては故障後でもリップ

ルを低減することが可能であることが確認できた。

今後の課題としては、安定性とリップル特性のより詳細な解析や光電変換系への応用等を検討している。

参考文献

- 1) R. Giral, L. Martinez-Salamero and S. Singer, Interleaved converters operation based on CMC, IEEE Trans. Power Electron., 14, 4, pp.643-652 1999.
- 2) X. Zhou, P. Xu and F. C. Lee, A novel current sharing control technique for low-voltage high-current voltage regulator module applications, IEEE Trans. Power Electron, 15, 6, pp.1153-1162 2000.
- 3) S. Banerjee and G. C. Verghese, eds., Nonlinear Phenomena in Power Electronics: Attractors, Bifurcations, Chaos, and Nonlinear Control, IEEE Press, 2001.
- 4) N. Femia, G. Lisi, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli, Distributed Maximum Power Point Tracking of Photo-voltaic Arrays: Novel Approach and System Analysis, IEEE Trans. Ind. Electron., 55, 7, pp. 2610-2621, 2008.
- 5) T. Ohata and T. Saito, Stability Analysis of Multi-Phase Synchronization in Paralleled Buck Converters with Winner-Take-All and Loser-Take-All Switching Rules, IEEE J. Emerg. Sel. Topics Circuits Syst., 5, 3, pp. 345-353, 2015.
- 6) Y. Murata and T. Saito, Stability of Paralleled Boost Converters with WTA Switching, Proc. of NOLTA, pp. 671-674, 2016.
- 7) K. Ando and T. Saito, Fault Tolerance of Boost Converters Coupled by WTA Switching, Proc. NOLTA, pp. 518-521, 2017.

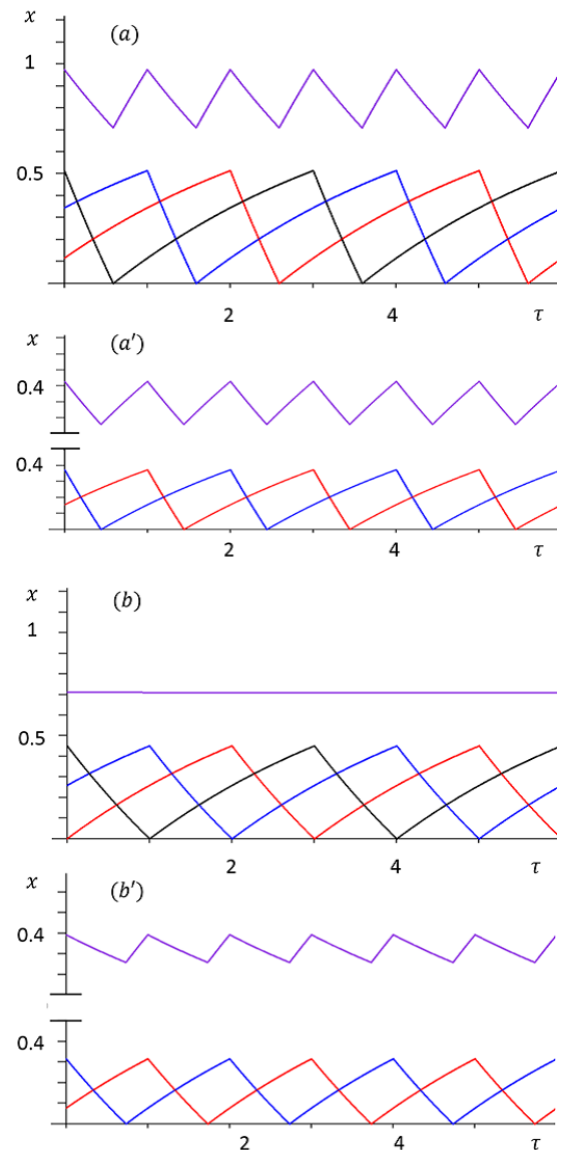


図 4 電流波形の典型例 ($a = 0.3, c = 0.3$). (a) 安定な 3-SYN ($b_1 = b_2 = b_3 = 0.6, R_p \approx 0.26$). (a') 安定な 2-SYN ($b_1 = b_2 = 0.6, R_p \approx 0.21$). (b) 安定な 3-SYN ($b_1 = b_2 = b_3 = 0.387, R_p = 0$). (b') 安定な 2-SYN ($b_1 = b_2 = 0.387, R_p \approx 0.13$).

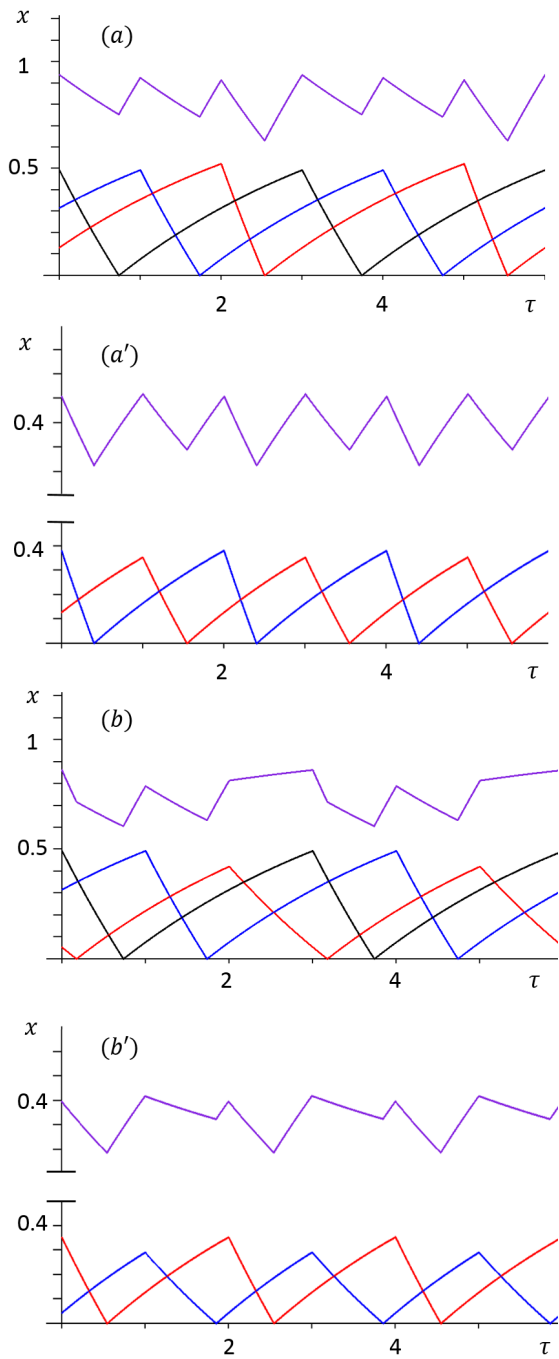


図 5 電流波形の典型例 ($a = 0.3, c = 0.3$). (a) 安定な 3-SYN ($b_1 = b_2 = 0.38, b_3 = 0.6, R_p \approx 0.18$). (a') 安定な 2-SYN ($b_1 = 0.38, b_2 = 0.6, R_p \approx 0.22$). (b) 安定な 3-SYN ($b_1 = b_2 = 0.38, b_3 = 0.2, R_p \approx 0.21$). (b') 安定な 2-SYN ($b_1 = 0.38, b_2 = 0.2, R_p \approx 0.13$).

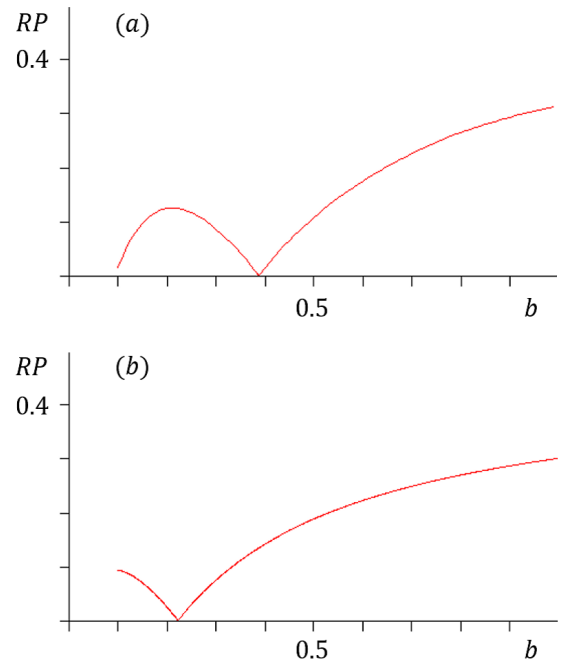


図 6 リップル特性 ($b = b_1 = b_2 = b_3$) (a) 3-SYN, (b) 2-SYN

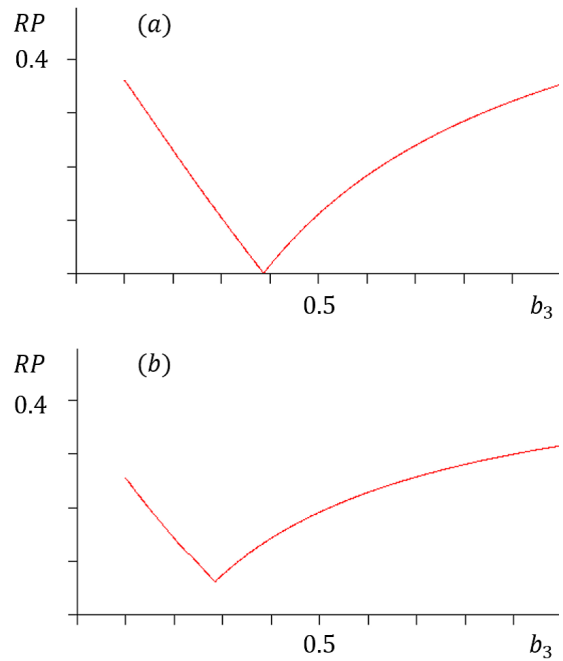


図 7 リップル特性 ($b = b_1 = b_2 = 0.6, b_3$: 変化) (a) 3-SYN, (b) 2-SYN