

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

WTAスイッチングを有する並列化昇圧コンバータの安定性解析

著者	村田 康臣
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	58
発行年	2017-03-31
URL	http://hdl.handle.net/10114/13552

WTA スwitchingを有する並列化昇圧コンバータの安定性解析

Stability analysis of Paralleled Boost Converters

村田 康臣

Yasuo MURATA

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 stability analysis of paralleled boost converters with WTA switching. We analyze basic dynamics of paralleled boost converters coupled by N boost converters through which N pieces of input voltage sources are applied to a load. We use Winner-Take-All(WTA) switching rule for switching of paralleled boost converters. So N converters are coupled. If some converter is broken, the other converters can preserve the operation. Simplifying the system into a piecewise linear model. Using piecewise linear model, we analyze stability of N phase synchronization and ripple characteristics exactly.

Key Words : Boost converter, WTA switching, Stability, Ripple

DC-DC コンバータは直流電圧を別の直流電圧に変換することのできる重要なエネルギー供給系であるため、広く研究 [1]-[4] が行われている。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ため、Current Sharing により信頼性・故障耐性の向上を実現することが可能である。一方、高次元の非線形スイッチ力学系であるため、これが呈する同期現象や分岐を解析することは極めて重要な基本問題である。DC-DC コンバータの代表例の 1 つに昇圧コンバータがある。これは出力電圧が入力電圧よりも大きくなる回路である。この回路は入力電圧を光電入力とする Maximum Power Point Tracking(MPPT) 技術や効率信頼性、入力の変化に対する応答の速さの向上 [5][6] などに関連している。

本論文では、並列化 DC-DC コンバータの一例として N 個の昇圧コンバータを並列に結合した系について考察を行う [7]。昇圧コンバータの研究は光電入力系の基礎となる。まず、位相制御に Winner-Take-All(WTA) スwitchingルール [4] を適用する。このスitchingにより、 N 相同期状態 (N-SYN) を自動的に実現できる。解析にはコンバータの負荷を定電圧源に置き換えた区分線形モデルを用いる。そのため、精密な数値解析が可能となる。そして並列化コンバータが何らかの原因で故障したときの N 個から $(N - 1)$ 個に変わるときの電流波形の変化について解析 [8] する。より詳細に解析するために入力電圧に対する安定性とリップルの変化についても調べる。

1. 並列化昇圧コンバータの基本動作

$N = 3$ の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。 $RC \gg T$ と仮定し、RC 負荷を定電圧源 $V_{o,j}$ と置き換えて解析を行う。ただし j はコンバータの引数であり $j = 1 \sim N$ とする。 $S_j = \text{ON}$ かつ $D_j = \text{OFF}$ の状態を State A、 $S_j = \text{OFF}$ かつ $D_j = \text{ON}$ の状態を State B と定義する。各コンバータはいずれかの状態をとるものとする。続いてス

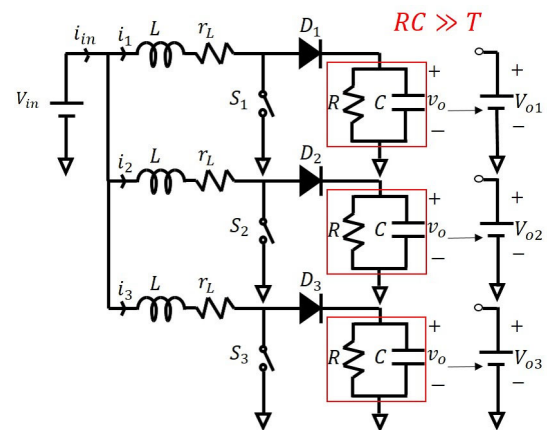


図 1 並列化昇圧コンバータ ($N = 3$) の区分線形回路モデル。

itchingルールについて定義する (図 2 参照)。 j 番目のコンバータの状態が State B であるとする。その際インダクタ電流 i_j は減少する。 i_j が下しきい値 $J_- (> 0)$ に達した時、状態を State A に切り替えて、 i_j は増加する。 State A から State B へは Winner-Take-All(WTA) スitchingに基づく。 WTA は周期的に電流値が最大であるコンバータを選択し、スitchingを行う。各コンバータの電流は、クロック周期 T ごとに WTA によって比較が行われる。そして、インダクタ電流が最大となるコンバータを Winner とし、対応するコンバータの状態を State B に切り替える。 WTA により、3つのコンバータは結合される。

$$SW \begin{cases} \text{State A} \rightarrow \text{State B} & \text{if } i_j \text{ is MAX at } t = nT \\ \text{State B} \rightarrow \text{State A} & \text{if } i_j = J_- \end{cases} \quad (1)$$

図 1 の無次元化方程式は以下ようになる。

$$\frac{dx_j}{d\tau} = \begin{cases} -\gamma x_j + a & \text{for State A} \\ -\gamma x_j - b_j & \text{for State B} \end{cases} \quad (2)$$

無次元化変数とパラメータ式 (3) に示す。

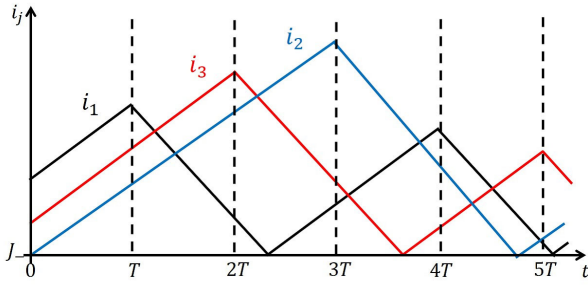


図 2 Winner-Take-All(WTA) スイッチングルール.

$$a = \frac{TV_{in}}{LJ}, \quad b_j = \frac{T(V_{oj} - V_{in})}{LJ}, \quad \gamma = \frac{Tr_L}{L} \quad (3)$$

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

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. 本研究ではパラメータ $b_1 = b_2 = \dots = b_j \equiv b$ とし, パラメータ a を変化させコンバータの電流波形の変化について見ていく. その他のパラメータ $b = 0.3$, $\gamma = 0.3$, $X_- = 0.05$ と固定する. 式 (5) に示した無次元化方程式より初期値 $(\tau, x) = (\tau_0, x_0)$ に対する区分線形厳密解は以下ようになる.

$$x_j(\tau) = \begin{cases} (x(0) - \frac{a}{\gamma})e^{-\gamma\tau} + \frac{a}{\gamma} & \text{for State A} \\ (x(0) + \frac{b}{\gamma})e^{-\gamma\tau} - \frac{b}{\gamma} & \text{for State B} \end{cases} \quad (4)$$

図 4 に図 1 の回路が呈する電流波形の典型例を 2 つ示す. 図 4(a),(b) はともに安定な 3 相同期である. それぞれの電流波形における同期の安定性 ($|Df|$) については後に述べる. 無次元化入力電流 $x_i \equiv x_1 + x_2 + x_3$ である. x_i のリップル R_p を以下のように定義する.

$$R_p = \max(x_o(\tau)) - \min(x_o(\tau)) \quad \text{for } 0 \leq \tau < N \quad (5)$$

図 4(a),(b) を比較すると, パラメータ a を変化させることによりリップル R_p が変化することがわかる.

2. 多相同期の安定性について

多相同期の安定性について定義を行う (図 3 参照). N-SYN となる各コンバータの状態の集合を $x_N = (x_{zN}, \dots, x_{NN})$ とする. $x(\tau)$ が, 微小な摂動 $\in (0)$ を含む初期値 $x(0) = x_N(0) + \in (0)$ に対して, 時間が経過すると $x_N(\tau)$ に収束する. このときに N-SYN は初期値に対して局所的に安定であるという. このとき, N-SYN に対応する不動点は

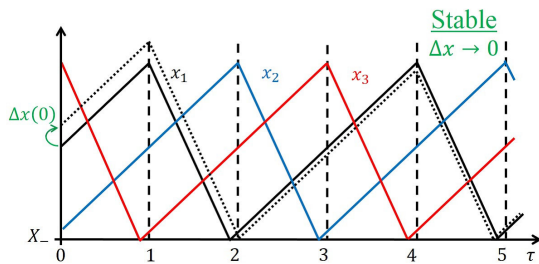


図 3 安定性の定義 ($\delta \rightarrow 0$ の場合に安定).

式 6 の条件を満たすときに安定となる. $|Df| > 1$ の場合には不安定となる.

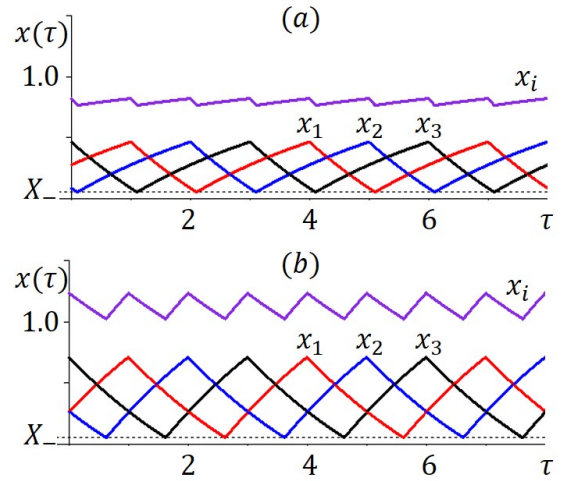


図 4 並列化昇圧コンバータの電流波形例 ($N = 3$, $b = 0.3, \gamma = 0.3, J_- = 0.05$). (a) 安定な 3-SYN ($a = 0.3$, $|Df| \approx 0.37, R_p \approx 0.06$). (b) 安定な 3-SYN ($a = 0.6$, $|Df| \approx 0.76, R_p \approx 0.21$).

$$|Df| \equiv \left| \frac{X_- - P_1}{X_- + P_2} e^{-\gamma N} \right| < 1 \quad (6)$$

ただし, $P_1 \equiv a/\gamma > 0$, $P_2 \equiv b/\gamma > 0$, $0 < X_- < P_1$ を満たすと仮定する. 式 6 より, 図 4 に示した電流波形 (a),(b) はともに $|Df| < 1$ であるため安定な 3 相同期 (3-SYN) であることがわかる.

3. 故障耐性について

並列化昇圧コンバータがある原因から 1 つのコンバータが故障したと仮定し, N 個から $(N - 1)$ 個に変わる状況について考える. 本論文では簡単のため $N = 4$ の故障について数値実験を行う. 図 5 には故障により安定な 4-SYN から安定な 3-SYN へと変化する電流波形の典型例を 2 つ示す. 図 5(a)(a') は故障の前後のリップルが減少している例である. つまり, 故障後に効率が良くなることがわかる. また図 5(b)(b') の例ではリップルが増加している. 故障後に効率が悪くなることがわかる. どちらの場合においても故障後も正常に動作し続けることがわかる. 続いて図 6 には故障により安定な 4-SYN から不安定な 3-SYN に変化する例を示す. 故障すると動作をつづけることができなくなる. 図 6(a)(a') は故障後に不安定な 3-SYN を呈するが, リップルが減少している例である. この不安定な 3-SYN を安定にすることができれば, 高効率化につながると考えられ, 今後の課題である. 図 7 には故障前後の安定性特性を示す.

4. まとめ

本稿では並列化昇圧コンバータの故障耐性について考察を行った. 安定な 4-SYN から安定な 3-SYN, 安定な 4-SYN から不安定な 3-SYN が存在することがわかり, 安定性の特性からも確認できる. 安定性の特性とリップルの特性を示すことにより, より詳細に解析することができた.

今後の課題には広い値での詳細な解析, 分岐現象, 工学的応用の模索等を検討している. また回路実験についても検討を行っている.

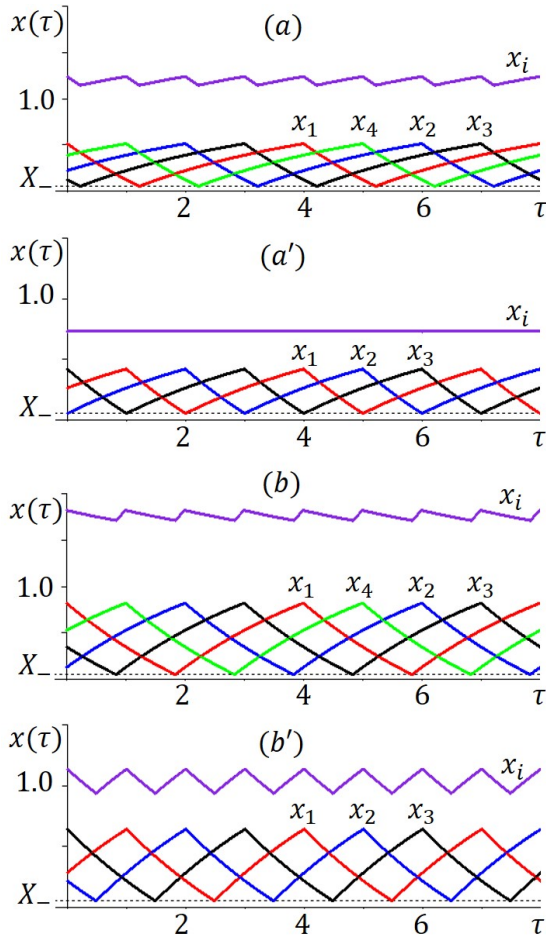


図 5 故障耐性 (安定 安定) ($b = 0.3, \gamma = 0.3, X_- = 0.05$). (a) 安定な 4-SYN ($b = 0.26, |Df| \approx 0.23, R_p \approx 0.09$). (a') 安定な 3-SYN ($b = 0.26, |Df| \approx 0.32, R_p \approx 0.00$); (b) 安定な 4-SYN ($b = 0.50, |Df| \approx 0.46, R_p \approx 0.11$). (b') 安定な 3-SYN ($b = 0.50, |Df| \approx 0.63, R_p \approx 0.20$).

参考文献

- 1) V. J. Thottuvelil and G. C. Verghese, Analysis of control design of paralleled DC/DC converters with current sharing, IEEE Trans. Power Electron, 13, 4, pp.635-644 1998.
- 2) R. Giral, L. Martinez-Salamero and S. Singer, Interleaved converters operation based on CMC, IEEE Trans. Power Electron, 14, 4, pp.643-652 1999.
- 3) S. Banerjee and G. C. Verghese, eds., Nonlinear Phenomena in Power Electronics: Attractors, Bifurcations, Chaos, and Nonlinear Control, IEEE Press, 2001.
- 4) 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)
- 5) H. S.-H. Chung, K. K. Tse, S. Y. Ron Hui, C. M. Mok and M. T. Ho, A Novel Maximum Power Point

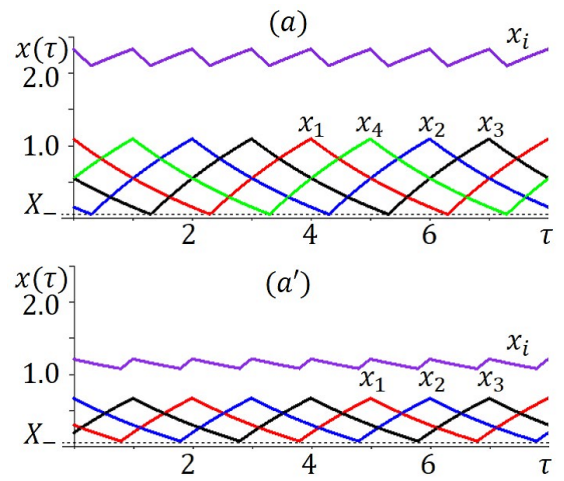


図 6 故障耐性 (安定 不安定) ($b = 0.3, \gamma = 0.3, X_- = 0.05$). (a) 安定な 4-SYN ($b = 0.80, |Df| \approx 0.75, R_p \approx 0.23$). (a') 不安定な 3-SYN ($b = 0.80, |Df| \approx 1.01, R_p \approx 0.14$).

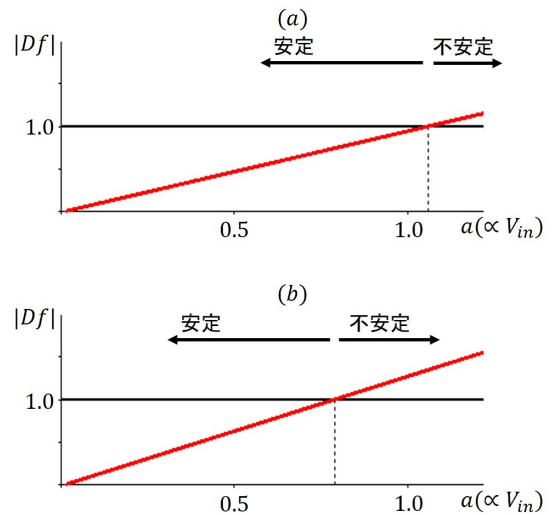


図 7 安定性 ($|Df|$) 特性 ($a = 0.3, \gamma = 0.3, X_- = 0.05$). (a) 故障前 ($N = 4$). (b) 故障後 ($N = 3$).

Tracking Technique for Solar Panels Using a SEPIC or Cuk Converter, IEEE Trans. Power Electron., 18, 3, pp. 717-724, 2003.

- 6) K. Kobayashi, H. Matsuo and Y. Sekine, Novel solar-cell power supply system using a multiple-Input dc-dc converter, IEEE Trans. Ind. Electron., 53, 1, pp.281-286, 2006
- 7) Y. Murata and T. Saito, Hyperchaos and synchronization in paralleled power converters, Proc. of 23rd Nonlinear Dynamics of Electronics Systems (NDES2015), Abstract booklet, p.13, 2015.
- 8) Y. Murata and T. Saito, Stability of Paralleled Boost Converters with WTA Switching, Proc. of 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2016), pp. 671-674, 2016.