

光電入力スイッチング電源の安定性に関する研究

WAKABAYASHI, Maho / 若林, 真帆

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・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 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

57

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

3

(発行年 / Year)

2016-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00013082>

光電入力スイッチング電源の安定性に関する研究

RESEACH RELATED TO STABILITY OF SWITCHING SOURCE BASED ON PHOTOVOLTAIC INPUT

若林 真帆

Maho WAKABAYASHI

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 bifurcation phenomena of boost converters with photovoltaic input and the average power. In the system, the photovoltaic input is simplified into a piecewise linear current-controlled voltage source (CCVS). The switching rule has nonlinear cycle. The system dynamics is described by simple piecewise linear equation and the 1D return map can be derived. The map describes switching phase and makes precise analysis possible. Typical periodic/chaotic phenomena related bifurcation phenomena are demonstrated and circuit experiment. Also, we will study about parallel converter.

Key Words : *particle swarm optimizers, multi-solution problems, discrete dynamical systems*

1. 導入

スイッチトダイナミカルシステム (Switched dynamical system) は離散的なスイッチングルールによる連続的なサブシステムで構成されている。 ([1]-[3])。SDS はその離散的なスイッチングルールやパラメータに依存して、様々な周期的、またはカオスな現象を呈する。典型的な SDS の例として、スイッチングパワーコンバータや A/D コンバータが研究されている。本研究では、光電入力ブーストコンバータに基づいた簡素な SDS の安定性や基本的な分岐現象考察している。光電入力のパワーコンバータは効率的な再利用エネルギーシステムとして近年注目されている ([4]-[6])。私たちのシステムでは、光電入力は太陽電池と対応している。光電入力は主に電流制御スイッチの DC/DC コンバータに利用されている。

解析を簡単にするために、一般的な太陽電池のなめらかな V-I 特性を 2 つの直線からなる区分線形特性に置き換えた。 [7] [8]。また、高周波であると仮定して出力の抵抗とコンデンサを定電圧源に置き換えている [9]。

次に 1 次元リターンマップを導入する。これにより基本周期軌道とその電力特性を正確に解析することができる。特に、不安定軌道が安定軌道に比べてより大きい平均電力を持つ可能性を明らかにした。

2. 実験回路とスイッチングルール

図 1 に簡易化した PV 特性を示す。ここで、より解析を簡略化するために無次元化パラメータを導入し、無次元化状態方程式を導く。

$$V_i(i) = \begin{cases} -\gamma_a(i - I_P) + V_P & \text{for } i \leq I_P \\ -\gamma_b(i - I_P) + V_P & \text{for } i > I_P \end{cases} \quad (1)$$

ブーストコンバータはスイッチ S とダイオード D を含み、これらによって 2 つの状態をもつ。

State 1: S conducting and D blocking

State 2: S blocking and D conducting

図 2 に回路図を示す。回路モデルにはブーストコンバータを用いる。光電入力の部分を定電圧源と 2 つの抵抗の等価回路に置き換える。また、コンデンサと抵抗を定電圧源に置き換える。これは時定数 RC が周波 T よりずっと大きいときに等価と考えることができる。スイッチングルールは以下のように定義する。

$$\begin{aligned} \text{State 1} &\rightarrow \text{State 2 at } t = nT \text{ and } i > J_- \\ \text{State 2} &\rightarrow \text{State 1 when } i = J_- \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 J_- は下しきい値である。図 3 にスイッチングルールを示す。

回路は State 1($S=\text{on}$, $D=\text{off}$) と、State 2($S=\text{off}$, $D=\text{on}$) のいずれかの状態をとる。回路が State1 の時は、 $t = nT$ でクロックパルスが来ると State2 に切り替わる。回路が State2 の時は、インダクタ電流 i が下しきい値 J_- に達すると State1 に切り替わる。このスイッチングルールは式 (1)、回路の動作は式 (2) で記述される。この動作を繰り返すことで、このシステムは様々な周期的/非周期的な現象を呈する。この回路動作は以下の式で記述される。

$$L \frac{di}{dt} = \begin{cases} V_i(i) & \text{for State 1} \\ V_i(i) - V_0 & \text{for State 2} \end{cases} \quad (3)$$

ただし、以下のような無次元化変数とパラメータを用いた：

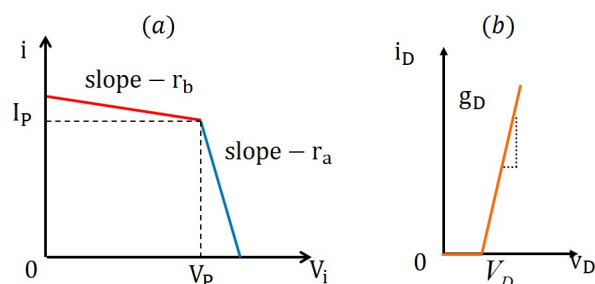


図 1 (a) 簡略化 PV 特性, (b) ダイオード特性

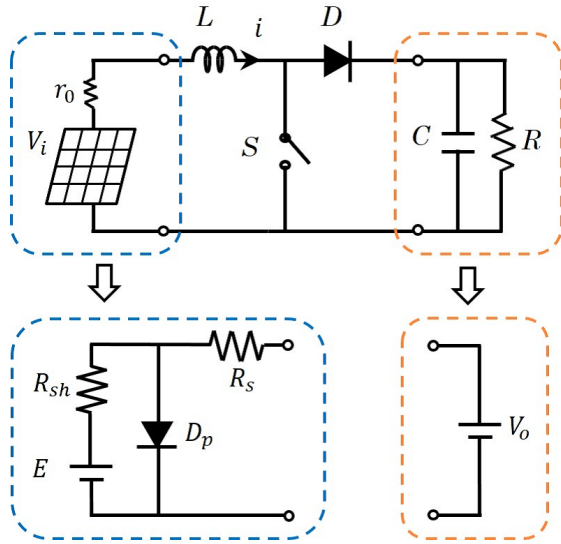


図 2 ブーストコンバータ

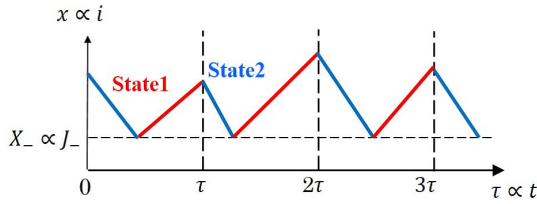


図 3 スイッチングルール

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{t}{T}, \quad x = \frac{i}{I_P}, \quad y(x) = \frac{T}{LI_P} V_i(I_P x), \quad \alpha = \frac{\gamma_a I_P}{V_P} \\ \beta &= \frac{\gamma_b I_P}{V_P}, \quad q = \frac{V_o}{V_P}, \quad \gamma = \frac{TV_P}{LI_P}, \quad X_- = \frac{J_-}{I_P}, \end{aligned} \quad (4)$$

また式 (1) と式 (3) は以下のように変形できる.

$$\frac{dx}{d\tau} = \begin{cases} \gamma y(x) & \text{for State 1} \\ \gamma(y(x) - q) & \text{for State 2} \end{cases} \quad (5)$$

$$y(x) = \begin{cases} -\alpha(x-1) + 1 & \text{for } x \leq 1 \\ -\beta(x-1) + 1 & \text{for } x > 1 \end{cases} \quad (6)$$

SW Rule:

$$\begin{aligned} \text{State 1} &\rightarrow \text{State 2: at } \tau = n \text{ and } x > X_- \\ \text{State 2} &\rightarrow \text{State 1: when } x = X_- \end{aligned} \quad (7)$$

この 5 つの無次元化パラメータは 2 つのクラスに分けることができる. (α, β, q) は太陽電池と負荷に関するパラメータ, (γ, X_-) はスイッチング制御に関するパラメータである.

State 1:

$$\begin{cases} x(\tau) = (x_0 - x_{e1})e^{-\gamma\alpha(\tau-\tau_0)} + x_{e1} & \text{for } x \leq 1 \\ x(\tau) = (x_0 - x_{e2})e^{-\gamma\beta(\tau-\tau_0)} + x_{e2} & \text{for } x > 1 \end{cases} \quad (8)$$

State 2:

$$\begin{cases} x(\tau) = (x_0 - x_{e3})e^{-\gamma\alpha(\tau-\tau_0)} + x_{e3} & \text{for } x \leq 1 \\ x(\tau) = (x_0 - x_{e4})e^{-\gamma\beta(\tau-\tau_0)} + x_{e4} & \text{for } x > 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} x_{e1} &= 1 + 1/\alpha, \quad x_{e2} = 1 + 1/\beta \\ x_{e3} &= q/\alpha - 1 - 1/\alpha, \quad x_{e4} = q/\beta - 1 - 1/\beta \end{aligned}$$

これより初期値 $(\tau, x) = (\tau_0, x_0)$ に対する正確な解は, 区分的厳密解として計算することができ, 以下のように記述することができる. γ は気温に依存するパラメータであり, 制御パラメータとして扱っている. 他のパラメータは以下のように固定する:

$$\alpha = 1.0, \quad \beta = 5, \quad q = 1.5, \quad X_- = 0.7.$$

次に瞬時電力, 平均電力を式 (10) に示す.

$$P_A = \frac{1}{N_P} \int_0^{N_P} P_i(\tau) d\tau, \quad P_i(\tau) = x(\tau)y(\tau), \quad (10)$$

これにより各不動点における平均電力を計算することができ, パラメータによる平均電力の推移を確認する. 不安定な不動点の平均電力 (図 4 (b), (c)) が安定な不動点 (4 (b'), (c')) よりも大きいことがわかった.

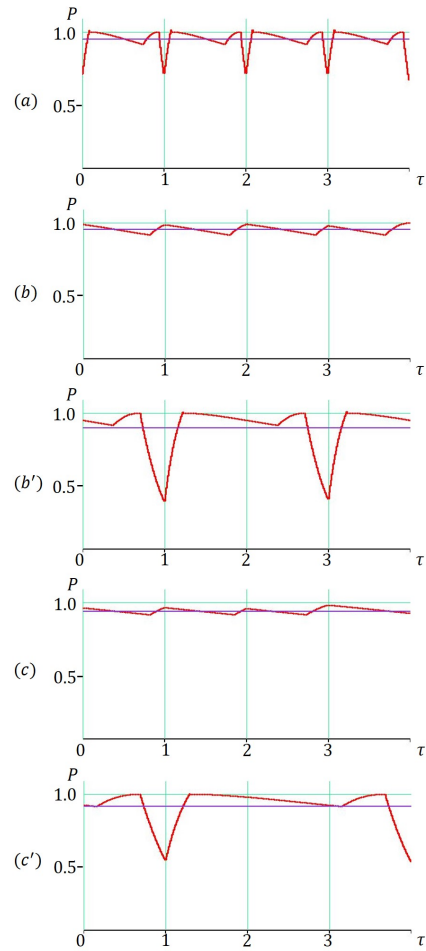


図 4 瞬時電力と平均電力 P_A . (a) 安定一周期軌道 $\gamma \doteq 1.4$, $P_A \doteq 0.945$. (b) 不安定二周期軌道 $\gamma \doteq 0.8$, $P_A \doteq 0.950$. (b') 安定二周期軌道 $\gamma \doteq 0.8$, $P_A \doteq 0.888$. (c) 不安定三周期軌道 $\gamma \doteq 0.5$, $P_A \doteq 0.936$. (c') 安定三周期軌道 $\gamma \doteq 0.5$, $P_A \doteq 0.911$.

3. リターンマップと安定性

電力特性の安定性を解析するためにリターンマップ (Rmap) を導入する. x_n は無次元化電流であり, n 番目のクロックの瞬間のものである. x_{n+1} はスイッチングルール

により, 図 x_n によって決定されるので, $x_{n+1} = F(x_n)$ と定義できる. リターンマップは区分的厳密解によって精密に計算できる. 図 6 に図 4 の時間波形に対応するリターンマップを示す. 図 6 (a) は安定な PEO(図 4 (a)) に対応する不動点を示している. γ を減少させていくと, この不動点は二周期軌道を経て不安定になり, さらにリターンマップは図 6 (b) のように安定な二周期の PEO を呈する. 不安定な不動点と安定な二周期軌道は図 4 (b) と (b') の波形と対応している. 図 7 (a) はパラメータ γ による安定性のグラフである. γ が 1.3 より減少すると安定な軌道から不安定な軌道へと変わっていくことがわかった.

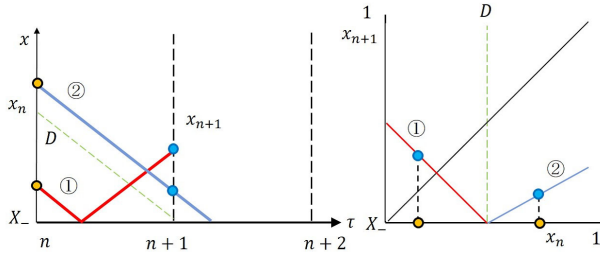


図 5 リターンマップの定義

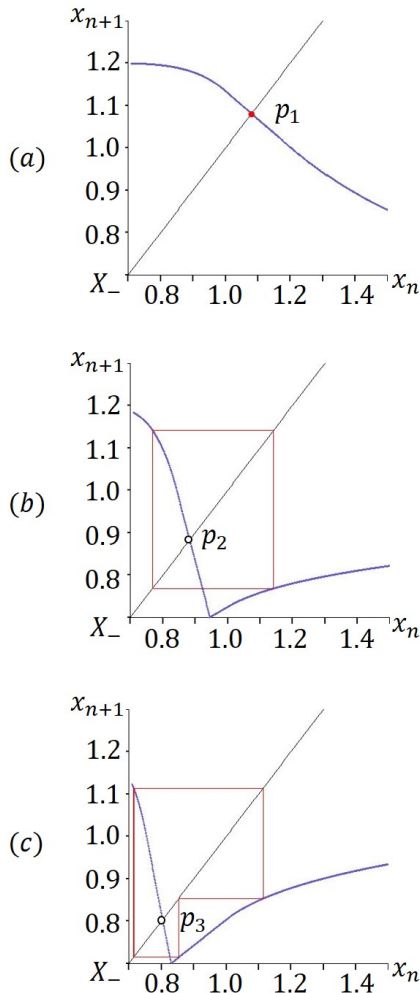


図 6 リターンマップの例 (a) $\gamma \doteq 1.4$ (b) $\gamma \doteq 0.8$ (c) $\gamma \doteq 0.5$.

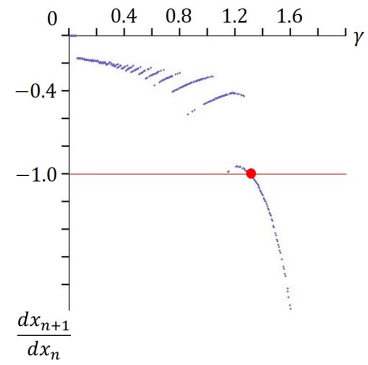


図 7 γ, β による安定性

4. むすび

本稿では光電入力ブーストコンバータに基づく簡素な SDS について考察した. 区分的線形特性とリターンマップを用いて安定性や平均電力を解析した. 特に不安定な周期軌道がより大きな平均電力を持つ可能性があることを明らかにした. 今後の課題はより詳細な分岐現象の解析や回路実験などが挙げられる.

参考文献

- 1) S. Banerjee and G. C. Verghese, eds., Nonlinear Phenomena in Power Electronics: Attractors, Bifurcations, Chaos, and Nonlinear Control, IEEE Press, 2001.
- 2) C. K. Tse and M. di Bernardo, Complex behavior in switching power converters, Proc. IEEE, 90, pp. 768-781, 2002.
- 3) J. H. B. Deane, P. Ashwin, D. C. Hamill and D. J. Jeffries, Calculation of the periodic spectral components in a chaotic dc-dc converter, IEEE Trans. Circuits Syst. I, 46, 11, pp. 1313-1319, 1999.
- 4) H. S.-H. Chung, K. K. Tse, S. Y. Ron Hui, C. M. Mok and M. T. Ho, A Novel Maximum Power Point Tracking Technique for Solar Panels Using a SEPIC or Cuk Converter, IEEE Trans. Power Electron., 18, 3, pp. 717-724, 2003.
- 5) N. D. Benavides and P. L. Chapman, Modeling the Effect of Voltage Ripple on the Power Output of Photovoltaic Modules, IEEE Trans. Ind. Electron., 55, 7, pp. 2638-2643, 2008.
- 6) D. Sera, R. Teodorescu, J. Hantschel and M. Knoll, Optimized Maximum Power Point Tracker for Fast-Changing Environmental Conditions, IEEE Trans. Ind. Electron., 55, 7, pp. 2629-2637, 2008.
- 7) D. Kimura and T. Saito, A Simple Switched Dynamical System based on Photovoltaic Systems, Proc. of NOLTA, pp. 487-490, 2009.
- 8) H. Matsushita and T. Saito, Application of Particle Swarm Optimization to Parameter Search in Dynamical Systems, NOLTA, IEICE, E94-N, 10, pp. 458-471, 2011.
- 9) T. Saito, T. Kabe, Y. Ishikawa, Y. Matsuoka and H. Torikai, Piecewise constant switched dynamical systems in power electronics, Int'l J. of Bifurcation and Chaos, 17, 10, pp. 3373-3386, 2007.