

平成 29 年 5 月 17 日現在

機関番号：35302

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26730134

研究課題名(和文)電力変換回路に生じる一部不安定な高周波振動の伝達メカニズム

研究課題名(英文)Relationship of Fast- and Slow-Scale Instabilities in Switching Power Converters

研究代表者

麻原 寛之(Hiroyuki, Asahara)

岡山理科大学・工学部・講師

研究者番号：50709615

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：電力変換回路に生じる電流・電圧波形には、一部分のみが不規則な挙動を呈する高周波振動(一部不安定な高周波振動)が内在している。本研究は、電力変換回路のスイッチング動作を模擬した簡素な回路モデルを提案し、一部不安定な高周波振動の伝達メカニズムを解明した。具体的には、回路パラメタの変化に伴い一部不安定な高周波振動が生じ、回路動作が不安定化し、分岐現象が発生する過程を理論および実験の両面から明らかにした。得られた結果は、産業分野に用いられる電力変換回路全般に共通する定性的性質と考えられ、工学的応用の一例として、DC/ACインバータ(電力変換回路の一種)の回路設計を行った。

研究成果の概要(英文)：Power converter circuits often have multiple inputs in the controller. The multiple inputs cause high- and low-frequency oscillations. In many cases, circuits with multiple inputs have a high dimensional topology which makes the detailed analysis difficult. This research analyzed a simple interrupted electric circuit in order to understand essential characteristics of the fast- and slow-scale dynamics. It was clarified that local bifurcation, which appears in fast-scale dynamics, does not significantly affect the global behavior of the system while instabilities in the slow-scale dynamics strongly affect the system behavior. As an example of the application, the circuit behavior in a DC/AC inverter was analyzed and the circuit parameter optimization was demonstrated.

研究分野：ソフトコンピューティング

キーワード：電力変換回路 安定性解析 離散写像 分岐現象

## 1. 研究開始当初の背景

パラメタの変化に伴い、回路の挙動が定性的に変化する現象は分岐現象と呼ばれる。回路の定性的性質を理解するうえで、分岐現象を解析しておくことは重要であり、古くから精力的に調査が行われてきた。これまで、単純な DC/DC コンバータ等に生じる分岐現象の発生メカニズムに関しては詳細な議論が行われてきたが、共振型コンバータや DC/AC インバータのような、回路方程式が高次元で記述される場合や複雑な挙動を呈する回路に生じる分岐現象の発生メカニズムに関しては未解決な問題が残っている。例えば DC/AC インバータは、比較的低次元で記述される回路モデルであるにも関わらず、異なる周波数の周期外力が印加されるがゆえに、電流および電圧波形に一部分のみが不安定な振動状態を呈する一部不安定な高周波振動が生じる場合があり、その伝達メカニズムは未解明である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、一部不安定な高周波振動の伝達メカニズムの解明である。ここで、電力変換回路に生じる一部不安定な高周波振動について説明する。図 1 に DC/AC インバータにみられる電流波形を示す。図中の破線領域に示すように、電力変換回路に生じる電流・電圧波形には一部分のみが不規則な挙動を呈する高周波振動(一部不安定な高周波振動)が内在している。また、電流波形は長い時間スケールで見ると正弦波状の低周波振動に見え、短い時間スケールで見ると、低周波振動の中に高周波振動が内在している様子が分かる。

電力変換回路の定性的性質を理解するうえで、これらの低周波振動および高周波振動の動的挙動を解析しておくことは重要であり、古くから精力的に研究が行われてきた。これまでの研究においては、低周波振動が安定(不安定)な状態であれば高周波振動もまた安定(不安定)な状態を保つと考えられてきた。一方、本研究の事前調査として、DC/AC インバータを解析していたところ、一部不安定な高周波振動を発見した。この一部不安定な高周波振動の発生は、電力変換回路の挙動が安定な状態から不安定な状態へと遷移する予兆であると考えられ、本研究の着想に至った。

本研究は、一部不安定な高周波振動の伝達メカニズムを解明し、この種の電力変換回路の安定性が失われる要因を本質的に理解するとともに、回路理論の発展および工学的応用へつなげることを目的とする。

## 3. 研究の方法

電力変換回路に生じる一部不安定な高周波振動に注目し、下記に取り組む。

- (1) 一部不安定な高周波振動がどのようなメカニズムで低周波振動へ伝播してい

るのかを明らかにする。具体的には、高周波振動および低周波振動の安定性を計算し、一部不安定な高周波振動の伝達メカニズムを数学的な観点から解明する。

- (2) 回路方程式が高次元で記述され、かつ一部不安定な高周波振動を有する電力変換回路に適用可能な安定性解析手法を提案する。
- (3) 回路実験による(1)(2)の検証を行う。また、スイッチング動作の遅れやノイズ等の予期せぬスイッチの誤動作が回路の定性的性質に影響を及ぼす場合は、回路シミュレーションにフィードバックし、より現実に即した現象解析および解析手法の検討へつなげる。

## 4. 研究成果

「3. 研究の方法」に記載した(1)(2)(3)に沿って説明する。

- (1) 図 2 に、電力変換回路のスイッチング動作を模擬した回路モデルを示す。また、図 3 に本回路の電圧波形を示す。本取り組み項目においては、図 3 中において破線領域に示す一部不安定な高周波振動が、回路の定性的性質に及ぼす影響を解明した。図 4 に示すように、局所的な分岐現象が発生する回路パラメタ近傍においては、一部不安定な高周波振動が発生した直後に低周波振動が安定した回路動作を保つが、回路パラメタの変化に伴い一部不安定な高周波振動の影響を受け、低周波振動が不安定化することが分かった。一方、図 5 に示すように、Border-Collision 分岐のような大域的分岐現象が生じる回路パラメタ近傍においては、一部不安定な高周波振動が発生した直後に離散写像の一部がボーダーを超え、Border-Collision 分岐が発生し、回路動作が不安定化することを確認した。以上より、一部不安定な高周波振動の伝達メカニズムは、直後に生じる分岐現象の種類に依存すると結論づけられる。
- (2) (1)では回路方程式が 1 次元で記述される回路を解析したが、その他の多くの電力変換回路は、回路方程式が 2 次元以上で記述されるため、(1)で用いた安定性解析手法が適用できない。このため、回路方程式が 2 次元以上で記述される電力変換回路に適用可能な安定性解析手法を提案した。具体的には、高周波振動および低周波振動の初期値依存性を考慮し、離散写像の合成および変分方程式の導出法について検討した。次に、一部不安定な高周波振動を有する電力変換回路の安定性を計算可能な汎用的アルゴリズムを提案した。最後に一例として、DC/AC インバータに対して提案手法を適用し、有効性および(1)にて得られた

一部不安定な高周波振動の伝達メカニズムを検証した。その結果、(1)で得られた定性的性質が DC/AC インバータに対しても同様に当てはまることを確認した。

- (3) 図 2 に示す回路を回路実装し、一部不安定な高周波振動の伝達メカニズムを検証した。(1)および(2)を通じて明らかになった定性的性質は、回路実験においても同様に確認できた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① H. Asahara, S. Banerjee, T. Kousaka. Relationship of Fast- and Slow-Scale Instabilities in Switching Circuit with Multiple Inputs. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2016. (In Press) 査読有 DOI: 10.1002/cta.2297
- ② T. Hiramure, H. Asahara, T. Kousaka. Fast- and Slow-Scale Bifurcations in an Interrupted Circuit with Multiple Inputs. *Journal of Signal Processing*, Vol. 19, No. 4, pp. 95-98, 2015. 査読有 URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsp/19/4/19\\_95/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsp/19/4/19_95/_article)
- ③ Y. Izumi, H. Asahara, T. Kousaka. Basic Study of Border-Collision Bifurcation in an Electric Circuit Including Fast-Scale and Slow-Scale Dynamics, *Journal of Signal Processing*, Vol. 18, No. 4, pp. 153-156, 2014. 査読有 URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsp/18/4/18\\_153/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsp/18/4/18_153/_article)

[学会発表] (計 13 件)

- ① Y. Hasesaka, K. Mori, T. Kousaka, H. Ohtagaki, H. Asahara. Nonlinear Oscillation of a Photovoltaic Cell Booster. Proc. of 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, pp. 68-70, 2016. (Yugawara, Japan)
- ② S. Hayashida, H. Asahara, T. Kousaka. Qualitative Behavior of Nonideal Switching Circuit with Two-Periodic Inputs. Proc. of 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, pp. 160, 2016. (Yugawara, Japan)
- ③ 横畑佳祐, 高坂拓司, 福江紘幸, 麻原寛之. PWM-1 電流制御 DC/DC コンバータにみられる非線形現象. 平成 28 電気学会九州支部沖縄支所講演会, OKI-2016-40, 2018. (琉球大学・沖縄県

中頭群)

- ④ 林田翔, 麻原寛之, 高坂拓司. スパイクノイズが 2 つの異なる周期外力を有する断続力学系に及ぼす影響. 2016 年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会大会, NLS-12, 2016. (東京理科大学・東京都葛飾区)
- ⑤ 麻原寛之, 高坂拓司. 合成力学系のパラメータ微分に関する一考察 -スイッチングタイミングの微小変動に注目した摂動計算法-. 2016 年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会大会, NLS-47, 2016. (東京理科大学・東京都葛飾区)
- ⑥ H. Kawano, T. Kousaka, H. Asahara. Dynamic Behavior of Current Controlled Full Bridge Inverter. Proc. of 2015 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, pp. 930-933, Dec. 2015. (Hong Kong, China)
- ⑦ H. Asahara, T. Kousaka. Nonlinear Oscillation in Current-Mode Controlled dc/ac Inverter. Proc. of 8th Chaotic Modeling and Simulation International Conference, p. 10, 2015. (Paris, France)
- ⑧ 麻原寛之, 高坂拓司. 単相フルブリッジインバータ回路にみられる分岐現象の解析. 電子情報通信学会技術報告, Vol. 115, NLP2015-60, pp. 125 - 128, 2015. (早稲田大学・東京都新宿区)
- ⑨ 平牟禮貴裕, 藤井太就, 麻原寛之, 高坂拓司. 2 つの周期外力を有するハイブリット力学系に生じる分岐現象. 電子情報通信学会技術報告, Vol. 114, NLP2014-119, pp. 37-40, 2015. (コンパルホール・大分県大分市)
- ⑩ S. Shosui, T. Fujii, H. Asahara, T. Kousaka. Qualitative Behavior for Simple H-Bridge Inverter. Proc. of 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, pp. 890-893, 2014. (Luzern, Switzerland)
- ⑪ Y. Ogura, H. Asahara, T. Kousaka. Stability of State-Period Dependent Non-linear Hybrid Dynamical System. Proc. of 7th Chaotic Modeling and Simulation International Conference. pp. 349 - 356, 2014. (Lisbon, Portugal)
- ⑫ 窪田健人, 松本洋和, 根葉保彦, 高坂拓司, 麻原寛之. Hブリッジインバータに生じる分岐現象について. 電気・情報関係学会九州支部第 67 回連合大会, 03-2A-04, 2014. (鹿児島大学・鹿児島県鹿児島市)
- ⑬ 麻原寛之, 松本洋和, 根葉保彦, 高坂拓司. dc/ac インバータに生じる高調波に関する一考察. 電子情報通信学会技術

[図書] (計 0 件)  
該当ありません。

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)  
該当ありません。

○取得状況 (計 0 件)  
該当ありません。

[その他]  
ホームページ等  
該当ありません。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

麻原 寛之 (ASAHARA Hiroyuki)  
岡山理科大学・工学部電気電子システム学  
科・講師  
研究者番号：50709615

(2) 研究分担者  
該当ありません。

(3) 連携研究者  
該当ありません。

(4) 研究協力者  
該当ありません。

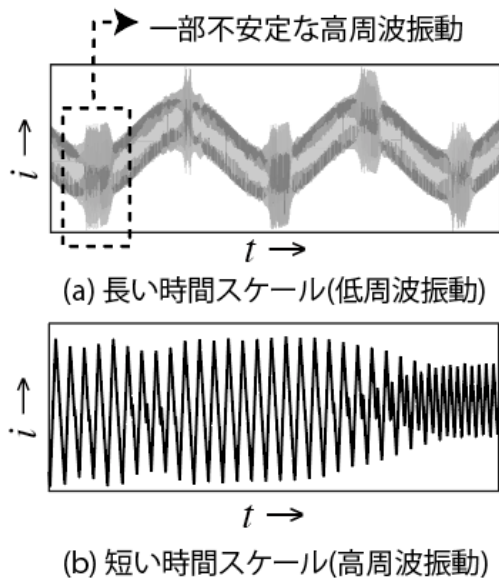


図 1. 電力変換回路に生じる電流波形

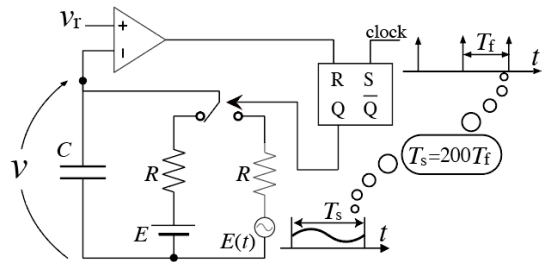


図 2. 一部不安定な高周波振動を有する  
断続回路

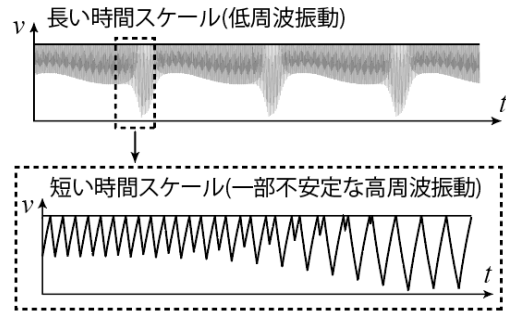


図 3. 図 2 に示す回路の電圧波形

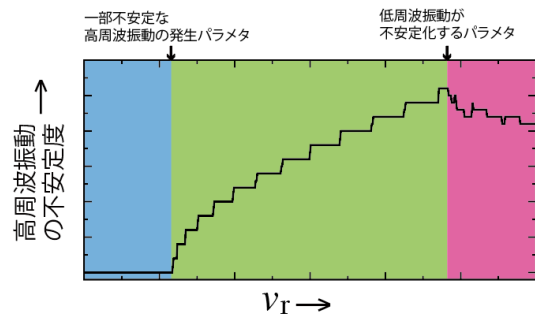


図 4. 一部不安定な高周波振動が局所的  
分岐現象に及ぼす影響

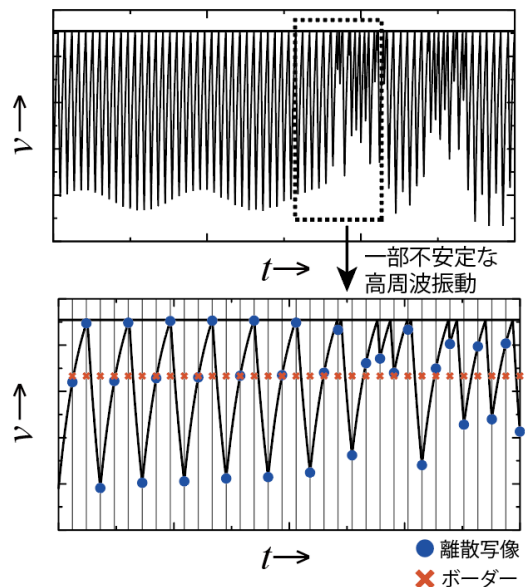


図 5. 一部不安定な高周波振動が大域的  
分岐現象に及ぼす影響