

# PWM 制御系の諸問題とその解決法に関する研究

長崎大学大学院生産科学研究科

和智 滋明

近年、PWM 電力増幅器を含む制御系（PWM 制御系）は、多くの分野、例えば、スイッチング電源、D クラスアンプ、サーボ装置等で用いられている。

しかしながら、PWM 制御系の挙動については、未だ解明されていない諸問題が多く、そのためにこれらの PWM 制御系の能力を十分に引き出すに至っていないと筆者は考える。

筆者の認識する重要課題としての「PWM 制御系の諸問題」とは、以下の4点に集約される。

第1の問題は PWM 制御系が DSP で代表されるサンプル値制御系と組み合わせて用いられる場合における0次ホールド時間遅れの問題である。

第2の問題は、インダクタ  $L$  とコンデンサ  $C$  とを復調器として有する PWM 回路を含む系が、本質的に非線形系であることから生じる問題である。

第3の問題は、半導体部の IC 化が進んだ現在でも、インダクタとコンデンサとを復調器として備えるために、PWM 制御系の1チップ IC 化が困難であるという問題である。

第4の問題は、PWM 制御系特有のスイッチングノイズが発生して、他の機器に妨害を与えるという問題である。

第1章では、これらの問題点を指摘している。第4の問題については、本論文では触れないが、第1の問題から第3の問題についての問題点の解明とそれに対する対策が、各章に書かれている。

第2章では、第1の問題を論じる。PWM 制御系の0次ホールド特性（可変パルス幅0次ホールド特性）が、位相遅れを生じさせ、サーボ帯域を狭くしてしまうことを明らかにし、それに対する解決策について論じている。

まず、位相遅れの発生は、信号取得の時刻と PWM 信号の出力の時刻とが一致しないサンプル値制御系に特有の問題であることを明確にする。

そして、従来の PWM 系の、0次ホールド特性に基づく位相遅れを改善する PWM 方式である IPM (Improved PWM) 方式を提案する。

IPW 方式は、一言で言うと、誤差信号を低域成分と高域成分とに分け、低域成分は PWM 信号の前縁に対応させ、高域成分は PWM 信号の後縁に対応させ、0次ホールド時間遅れを小さくするものである。

IPWM 方式の説明に際して、解析の対象は光ディスク装置とし、実測によって IPWM 方式の効果を確認し、一例として、IPWM 方式を採用する場合には、従来の PWM 方式を採

用する場合に較べて、実質的な時間遅れを  $1/6$  にすることができることを示す。また、IPWM 方式のよって立つ理論的根拠とその限界を明らかにする。

第 3 章では、第 2 の問題を論じる。PWM 系が非線形系であることを明らかにして、この非線形性の内容を電流不連続モードと電流連続モードの各々について、定量的に解析する。この解析結果を用いて、非線形性の故に生じていた、制御系の不安定性と、制御系の性能劣化とを取り除くための非線形キャンセル方式を提案する。

非線形キャンセル方式は、非線形性の逆特性を制御系に挿入して非線形特性をキャンセルするものである。さらに、高速で非線形キャンセル方式を動作させるハードウェアであるノンリニアキャンセラを提案する。

そして、コンピュータシミュレーションによって、スイッチング電源にノンリニアキャンセラを適用する場合に、電流モードの違い、入力電圧、出力電圧の違いによらず、サーボ帯域を一定とすることができることを明らかにする。一例として、従来は 1MHz が限界であったスイッチング電源のサーボ帯域を 8MHz にまで拡大できることを明らかにする。また、サーボ帯域拡大の結果として過渡特性も改善できることを明らかにする。

第 4 章では、第 3 の問題を論じる。モデルとしては、実用的な観点からスイッチング電源を用い、現在、その糸口が明確ではないスイッチング電源の完全 IC 化について、一つの提案をする。この第 4 章は第 3 章で得られた成果の実用上の意味を明らかにする目的も同時に有するものであり、第 3 章で提案されたノンリニアキャンセラを用い、サーボ帯域を広くして、復調フィルタを形成するコンデンサ  $C$  の容量を小さくすることによる IC 化の可能性を検討する。

しかしながら、ノンリニアキャンセラのみでは、制御系の問題は解決しても、電力系のリップル問題が立ち上がることを示し、両者を両立させる手法として、ノンリニアキャンセラと、マルチフェーズコンバータとの組み合わせを提案する。なお、マルチフェーズコンバータ自体は従来から知られている技術である。

コンピュータシミュレーションにより、スイッチング周波数、マルチフェーズの相数と必要な、 $L$  の値、 $C$  の値との関係を求める。

一例として、スイッチング周波数 100MHz の 4 相コンバータとノンリニアキャンセラとの組み合わせにおいて、サーボ帯域 20MHz を得て、2.4nH のインダクタ  $L$  を用い、出力電圧 1.8V、出力電流 60A の定電圧スイッチング電源の 1 チップ IC 化が可能ではないかと考える。

